



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

LEPENÍ FDM 3D TIŠTĚNÝCH DÍLŮ Z PLA

GLUING OF FDM 3D PRINTED PARTS FROM PLA

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Filip Šlimar

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Oskar Zemčík, Ph.D.

BRNO 2021

Zadání diplomové práce

Ústav: Ústav strojírenské technologie
Student: **Bc. Filip Šlimar**
Studijní program: Strojní inženýrství
Studijní obor: Strojírenská technologie
Vedoucí práce: **Ing. Oskar Zemčík, Ph.D.**
Akademický rok: 2020/21

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Lepení FDM 3D tištěných dílů z PLA

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Autor provede rešerši lepení PLA tištěných dílů s použitím FDM tisku. Vytipuje vhodné metody pro spojování těchto materiálů. Navrhne vhodný experiment pro ověření mechanické pevnosti takto lepených dílů. Navržený experiment provede a vyhodnotí. Následně na základě výsledků doporučí vhodné metody lepení PLA dílů pro rozdílné aplikace. Součástí práce bude rovněž technicko–ekonomické vyhodnocení.

Cíle diplomové práce:

- rešerše metod lepení 3d fdm tištěných dílů
- návrh metod lepení pro experiment
- návrh experimentu pro ověření mechanických vlastností
- vyhodnocení experimentu
- technicko–ekonomické vyhodnocení

Seznam doporučené literatury:

BILÍK, Oldřich a Martin VRABEC. Vrabec Martin Technologie obrábění s využitím CAD/CAM systémů. Ostrava: Vysoká škola báňská-Technická univ., 2002, 128 s. ISBN 80-248-0034-9.

FOŘT, Petr a Jaroslav KLETEČKA. Autodesk Inventor. Brno: Computer Press, 2007, 296 s. ISBN 978-80-251-1773-6.

CHANG, Tien-Chien, Richard WYSK a Hsu-Pin WANG. Computer-Aided Manufacturing. 3. vyd. New Jersey: Prentice Hall, 2005, 684 s. ISBN 0-13-142919-1.

CHUA, Chee Kai, Kah Fai LEONG a Chu-Sing LIM. Rapid Prototyping: Principles and Applications. 3. vyd. Singapore: World Scientific Publishing Co., 2010, 512 s. ISBN 978-981-277-897-0.

PÍŠKA, Miroslav et al. Speciální technologie obrábění. 1. vyd. Brno: CERM, 2009, 246 s. ISBN 978-80-214-4025-8.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2020/21

V Brně, dne

L. S.

doc. Ing. Petr Blecha, Ph.D.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Práce se zabývá teorií 3D tisku, materiály pro tisk a lepením. Zaměřuje se na FDM tisk a PLA materiál. Dále srovnává lepení s jinými metodami a věnuje se rozdělení lepidel, postupu lepení a zkouškám lepených spojů. Práce také na základě literární studie navrhuje experiment k hodnocení vybraných lepidel. Praktická část obsahuje popis, výsledky a vyhodnocení experimentu. Hodnocení lepidel probíhalo na základě pevnosti v tahu a smyku.

Klíčová slova

3D tisk, FDM, PLA, lepení, lepidlo, tahová pevnost, smyková pevnost

ABSTRACT

The thesis deals with the theory of 3D printing, materials for printing and bonding. It focuses on FDM printing and PLA material. It also compares gluing with other methods and deals with the distribution of adhesives, the gluing procedure and tests of glued joints. The work, based on literature studies, proposes an experiment to evaluate selected adhesives. The practical part contains a description, results and evaluation of the experiment. The evaluation of adhesives is based on tensile and shear strength.

Key words

3D print, FDM, PLA, gluing, adhesives, tensile strength, shear strength

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

ŠLIMAR, Filip. *Lepení FDM 3D tištěných dílů z PLA* [online]. Brno, 2021 [cit. 2021-05-14]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/132150>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. 63 s. Vedoucí práce Oskar Zemčík

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma **Lepení FDM 3D tištěných dílů z PLA** vypracoval(a) samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

19.5.2021

Datum

Bc. Šlimar Filip

PODĚKOVÁNÍ

Tímto bych chtěl poděkovat panu Ing. Oskaru Zemčíkovi, Ph.D za jeho pomoc a cenné rady týkající se diplomové práce. Také bych rád poděkoval rodině za podporu během studia.

OBSAH

Úvod	7
1 Rozbor zadání.....	8
2 3D tisk.....	9
2.1 Metody	9
2.2 Technologické parametry FDM tisku	12
2.3 Mechanické vlastnosti polymerů.....	13
2.3.1 Rázová houževnatost	13
2.3.2 Tahové vlastnosti	13
2.3.3 Pevnost za vyšších teplot	15
2.4 Polymery	15
2.4.1 PLA	16
2.4.2 ABS.....	16
2.4.3 PET	16
3 Princip lepení	17
3.1 Srovnání s dalšími metodami	17
3.2 Adheze	18
3.3 Koheze	18
3.4 Smáčivost	19
3.5 Rozdělení lepidel	20
3.6 Technologický postup lepení	21
3.7 Návrh lepeného spoje	22
4 Zkoušky lepených spojů	24
4.1 Zkouška pevnost v tahu	24
4.2 Zkouška pevnosti ve smyku	24
4.3 Zkouška odlupování	25
4.4 Rázová zkouška.....	26
4.5 Poruchy lepených spojů	26
5 Experiment.....	28
5.1 Popis zkoušky	28
5.2 Použitá lepidla	30
5.3 Přípravky	31
5.4 Vyhodnocení zkoušky pevnosti v tahu.....	32
5.5 Vyhodnocení zkoušky pevnosti ve smyku	46
6 Technicko-ekonomické zhodnocení	57
Závěr	59
Seznam použitých zdrojů	
Seznam použitých symbolů a zkratk	

ÚVOD

Lepení je metoda spojování stejných nebo rozdílných materiálů pomocí lepidla. Jedná se o metodu, která byla využívána již v době kamenné, kdy za pomoci smůly byly vytvářeny nástroje z kamene a dřeva [1]. Tato technologie se stále vyvíjela a s příchodem chemie a plastů nastal ve 20. století velký pokrok. Lepení stále získává na popularitě a vzrůstá jeho podíl při spojování materiálů [2]. Využívá se téměř ve všech průmyslových odvětvích. Velice patrný vzrůst popularity lepení je v automobilovém, leteckém a elektrotechnickém průmyslu. Hlavním důvodem jsou nároky na snížení hmotnosti a ceny. Z toho důvodu je výhodou nízká technologická náročnost a nízká hmotnost lepeného spoje. Často je lepení jedinou vhodnou metodou ke spojení materiálů, protože nenaruší lepený díl [3]. Se vzrůstající oblibou lepení rostou i nároky na tuto metodu. Nároky se mohou týkat například pevnosti, chemické nebo tepelné odolnosti. Důležitá je i schopnost lepit různé materiály, protože každé lepidlo je vhodné k lepení jen některých materiálů.

3D tisk je na rozdíl od lepení poměrně nová technologie, její počátek je v druhé polovině 20. století [4]. První patentovanou metodou byla stereolitografie a brzy následoval vznik dalších metod. Stále vznikají nové metody a vylepšují se již existující. Také stoupá popularita 3D tisku a rozsah použití, kromě výroby prototypů se již využívají k výrobě konečných produktů. Velkou popularitu získala především metoda FDM (fused deposition modeling), tato metoda má svá specifika v porovnání s jinými metodami.

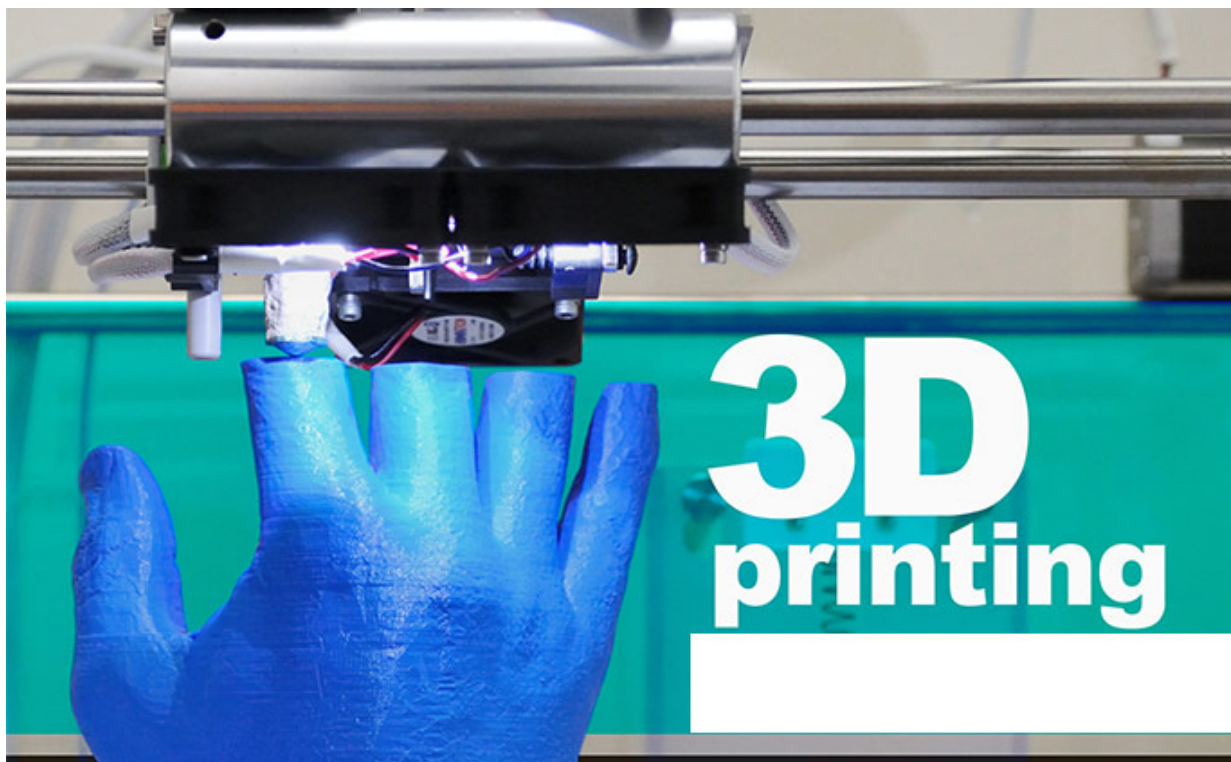
Vzhledem k nárůstu popularity lepení a FDM tisku, je pravděpodobné, že bude docházet k jejich kombinaci, takovým příkladem může být slepení tištěného dílu s jiným materiálem nebo rozložení příliš velkého dílu pro tiskovou plochu na několik menších. Práce by se měla pokusit najít vhodné řešení.

1 ROZBOR ZADANÍ

Cílem této diplomové práce je vytipovat vhodná lepidla pro lepení 3D tištěných dílů z PLA (Polylactic acid, neboli kyselina polymléčná). Následně provést zatěžující zkoušku a vybrat nejvhodnější, případně ohodnotit výhody a nevýhody jednotlivých lepidel. Z toho důvodu bude nutné seznámení se znalostmi v oblasti 3D tisku a lepení, tímto se bude zabývat první část práce. Druhá, praktická, část práce se bude zabývat experimentem na základě znalostí získaných v předchozí části.

Teoretická část práce se bude věnovat 3D tisku (viz obr. 1.1), rozdílům mezi jednotlivými metodami se zaměřením na FDM tisk, který bude součástí praktické části práce. Také budou srovnány materiály pro tuto metodu tisku. Další část práce se bude věnovat lepení, včetně postupu lepení. Pro splnění cílů, které si tato práce klade je nutné, se seznámit mimo technologie lepení také s lepidly a způsoby testování lepených spojů.

Praktická část práce se bude skládat z volby metody k hodnocení kvality spoje a volby lepidel. Dále by měl být popsán postup zkoušky, za tímto účelem je nutné definovat tvar a materiál vzorků. Následně bude provedena zkouška a zapsány výsledky, budou také provedeny výpočty potřebné pro zhodnocení výsledků. Poslední část práce se bude věnovat techniko-ekonomickému zhodnocení.



Obr. 1.1 Ukázka 3D tisku [46]

2 3D TISK

Jedná se aditivní technologii, tedy dochází k nanášení materiálu po jednotlivých vrstvách. Oproti například soustružení, kde je materiál postupně odebírán. Existuje celá řada metod 3D tisku, které se od sebe mohou značně lišit v použitém materiálu, rychlosti tisku, ceně, přesnosti a kvalitě povrchu. Jednotlivé metody mají různá omezení [5]. Tyto faktory je vhodné znát pro volbu vhodné technologie.

Všechny metody 3D tisku vychází z počítačového modelu, který je následně zpracován do kódu pro danou tiskárnu. Model může vzniknout naskenováním existující součásti, nebo může být vytvořen v modelovacím programu [5,6].

3D tisk bývá často spojován s pojmem rapid prototyping, kdy se zpravidla jedná o vytvoření prototypu k ověření vzhledu, případně částečné nebo celkové funkčnosti. Tento proces se může několikrát opakovat, než dojde k samotné výrobě. Nejčastěji se k výrobě prototypu používá právě 3D tisk [6,7].

2.1 Metody

Máme k dispozici mnoho technologií 3D tisku, všechny mají společné nanášení materiálu po jednotlivých vrstvách a lze je rozdělit, například podle materiálu, ze kterého tisknou [5]:

a) Fotopolymer

Existuje celá řada technologií využívající tento materiál, příkladem je stereolitografie – SLA. Při tomto procesu dochází k vytvrzování epoxidové pryskyřice po jednotlivých vrstvách odpovídajících vrstvám modelu. Tohoto efektu je dosaženo pomocí laserového paprsku, který je usměrňován řídicím systémem tiskárny [5]. Po dokončení vrstvy dojde k posunutí platformy o tloušťku vrstvy, zpravidla 0,05 až 0,15 mm [8]. Mezi výhody této metody patří široký rozsah použitelných materiálů, přesnost tisku a kvalita povrchu, naopak nevýhodou je nutnost opracovat vytištěný díl [5,8,9].

b) Práškový materiál

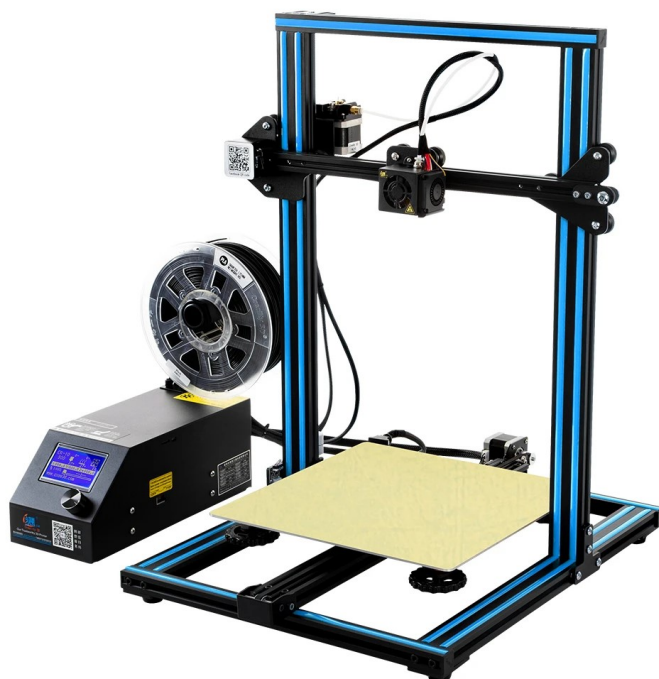
Některé metody v této skupině jsou podobné metodám pracujícím s fotopolymery, rozdílem je samozřejmě použitý materiál, příkladem takové technologie je Selective laser sintering – SLS (česky: selektivní spékání laserem). Materiál je ve formě jemného prášku, může se jednat o plasty, kovy, pryže, keramiku a speciální písky. Podstatou tohoto procesu je nanášení vrstvy prášku, následné spékání částic pomocí laseru. Nenatavený materiál slouží jako podpora pro další vrstvy a po dokončení tisku je odstraněn. O vertikální pohyb se stará posuvná deska. Oproti metodě SLA jsou výsledné díly přesnější a pevnější, naopak nevýhodou je složitější proces a nízká kvalita povrchu [5].

c) Tuhý materiál

Nejrozšířenější technologií nejen na této bázi ale obecně je fused deposition modeling – FDM. Tato metoda je v mnoha ohledech velice specifická oproti jiným metodám. Podstatou je natavování materiálu, který je ve formě drátu navinutý na cívku. Pomocí kladek je natahován do tiskové hlavy, kde je zahříván a následně vtlačován přes vyhřívanou trysku na povrch. První vrstva je tisknuta na vyhřívanou desku. V mnoha případech je nutné tisknout kromě samotného modelu také podpory,

které je nutné po dokončení tisku odstranit [5]. Pohyb zajišťuje tisková hlava nebo deska, případně kombinace. Kinematický systém můžeme rozdělit na [10]:

- Kartézský – jedná se o nejrozšířenější způsob, k pohybu dochází v osách XYZ. Na obrázku 2.1 je znázorněna FDM tiskárna s kartézskou kinematikou [10].



Obr. 2.1 FDM tiskárna s kartézskou kinematikou [11].

- Delta – pohyb tiskové hlavy zajišťují tři ramena, z důvodu složitější geometrie je nutný speciální software a je složitější kalibrace, výhodou je větší tiskový prostor a rychlejší tisk. Obrázek 2.2 ukazuje delta tiskárnu [10].



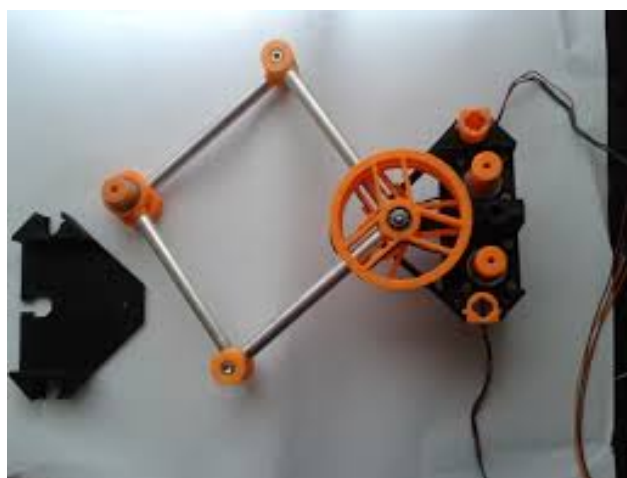
Obr. 2.2 FDM tiskárna s delta kinematikou [12].

- Polární – využívá se rotační podložky a pohybu tiskové hlavy ve dvou osách. Tato metoda má výhody při tisku rotačních součástí, ale není příliš rozšířená. Na obrázku 2.3 je znázorněna FDM tiskárna s polární kinematikou [10].



Obr. 2.3 FDM tiskárna s polární kinematikou [10].

- Scara – pohyb tiskové hlavy zajišťují dvě ramena nebo jedno dvoukloubové. Jedná se o okrajovou metodu, podobně jako u polárního systému. Obrázek 2.4 ukazuje možné provedení tiskárny scara [10].



Obr. 2.4 FDM tiskárna s scara kinematikou [10].

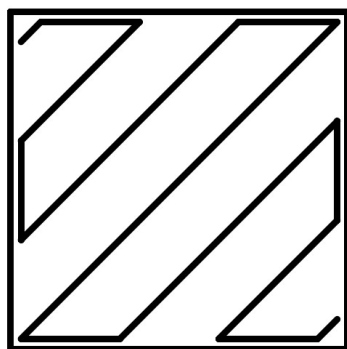
Nevýhodou FDM technologie je nekvalitní povrch, lze rozeznávat jednotlivé vrstvy a dráhy tisku. Výhodou je široký rozsah materiálů, minimální odpad, jednoduchost celého procesu a díky silným vazbám mezi jednotlivými vrstvami lze tisknout funkční díly [5,10].

2.2 Technologické parametry FDM tisku

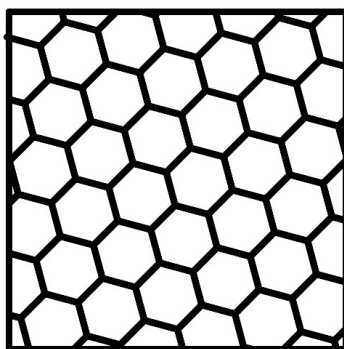
FDM tiskárny mají velký rozsah nastavitelných parametrů, příkladem je například teplota tiskové hlavy, teplota vyhřívané podložky, výška vrstvy a rychlost chladicího větráku. Tyto parametry se nastavují v programech zvaných slicer, příkladem takového programu je PrusaSlicer, Simplify3D a Cura. Součástí sliceru mohou být i odladěné tiskové profily, které je možné dále přizpůsobit vlastním požadavkům. Parametry jako teplota podložky a trysky je doporučená výrobcem, zpravidla se jedná o rozsah teplot, který by měl být dodržen. Tyto teploty ovlivňují především vzhled dílu [13].

Dalším parametrem je výška vrstvy, tento parametr má vliv nejen na vzhled, ale také na drsnost povrchu a vrubový účinek. Proto je pro kvalitní tisk vhodná co nejmenší výška vrstvy tím ovšem dochází k prodloužení času tisku, například při zmenšení výšky vrstvy na polovinu musí tisková hlava ujet dvakrát větší vzdálenost a tím plyne i téměř dvakrát delší čas tisku [13]. S výškou vrstvy souvisí i její orientace platí, že díly mají vyšší pevnost v rovině vodorovné s tiskovou vrstvou [14]. V některých případech změna orientace může výrazně zkomplikovat tisk. Další parametr je šířka obvodových stěn a výplň dílu. V rámci jednotlivých slicerů je možné zvolit vzor výplně (viz obr. 2.5) a procentuální zaplnění. S rostoucím množstvím výplně roste pevnost dílu ale také množství použitého materiálu, hmotnost dílu a čas tisku [13].

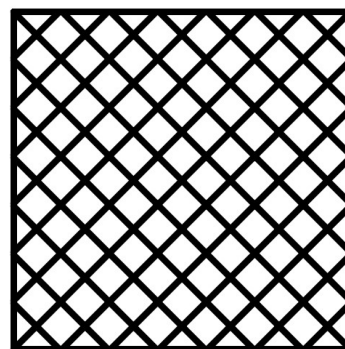
Posledním z důležitých parametrů jsou podpěry, jedná se o technologickou úpravu modelu. Podpěry slouží jako podpora modelu v místech kde by nedošlo k tisku na podložku nebo již vytištěný materiál. Podpěry nejsou nutné v místech, kde je úhel mezi povrchem a podložkou větší než 45° [13,14], nebo pokud se jedná o vodorovný tisk mezi dvěma vytištěnými body. Nevýhodou tištění s podporami je vyšší spotřeba materiálu, nutnost tyto podpory odstraňovat a povrch spojený s podpěrou má horší kvalitu. Existují tiskárny s více tiskovými hlavami, to umožňuje tisknout zároveň z více materiálů, díky tomu lze tisknout podpory z materiálu, který se rozpustí a neovlivní povrch [13].



Rectilinear



Honeycomp



Rectangular

Obr. 2.5 Příklady výplní dílů [13].

2.3 Mechanické vlastnosti polymerů

Pro srovnání jednotlivých plastů je nutné definovat vybrané vlastnosti a také způsob jejich zkoušky.

2.3.1 Rázová houževnatost

Rázová houževnatost je schopnost materiálu rychle absorbovat energii. Zkouška je důležitá, jelikož s větší rychlostí namáhání se polymery stávají křehčí a může dojít k jejich porušení již při malé deformaci. Faktory ovlivňující houževnatost jsou složení, teplota, stárnutí, vlhkost a zvolená zkouška. K měření se používá zkouška Charpy, nebo IZOD. V případě zkoušky Charpy je vzorkem hranol, který je umístěn vodorovně a volně opřen o podpěry, následně je přeražen pomocí rázového kladiva. V případě, že nedojde k porušení, je vzorek opatřen vrubem, aby došlo ke koncentraci napětí a porušení vzorku, v tomto případě se jedná o vrubovou houževnatost. Tvar vrubu je jasně definovaný a směřuje od kyvadla. Měří se energie spotřebovaná na přeražení vzorku, lze ji zjistit z rozdílu energie kladiva před a po zkoušce. Metoda IZOD je velice podobná, liší se zejména způsobem upnutí vzorku a směřováním vrubu [15].

Vztah pro výpočet rázové houževnatosti Charpy [15]

$$a_{cU} = \frac{E_c}{b \cdot h} \text{ [kJ/m}^2\text{]} \quad 2.1$$

kde: E_c - kinetická energie [kJ]

b – šířka vzorku [m]

h - tloušťka vzorku [m]

Vztah pro výpočet vrubové houževnatosti Charpy [15]

$$a_{cN} = \frac{E_c}{b_N \cdot h} \text{ [kJ/m}^2\text{]} \quad 2.2$$

kde: b_N – šířka vzorku pod vrubem [m]

2.3.2 Tahové vlastnosti

Vzorek (viz obr. 2.6) je upevněn do čelistí zkušebního stroje a následně vystaven jednoosému tahovému namáhání s konstantním nárůstem normálového napětí. Během zkoušky se zaznamenává velikost působící síly a prodloužení vzorku, z těchto hodnot je možné vypracovat deformační křivku (viz obr. 2.7), která udává poměr mezi smluvním napětím a poměrným prodloužením vzorku [15].

Vztah pro smluvní napětí [15]

$$\sigma = \frac{F}{S_0} \text{ [MPa]} \quad 2.3$$

kde: F – působící síla [N]

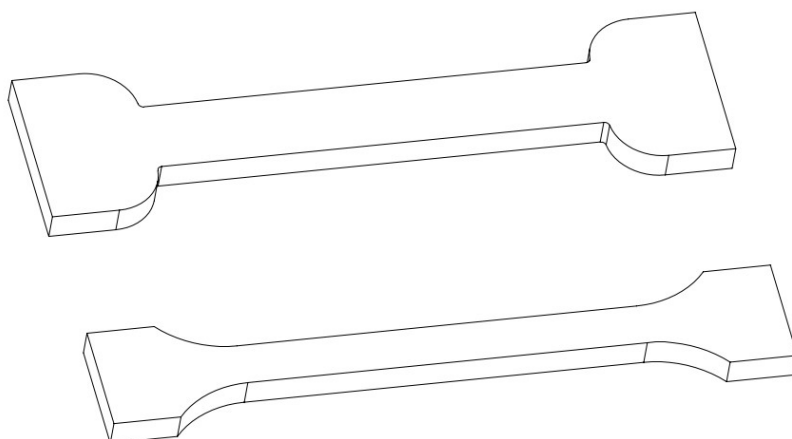
S_0 – původní průřez zkušebního tělesa [mm²]

Vztah pro poměrné prodloužení [15]

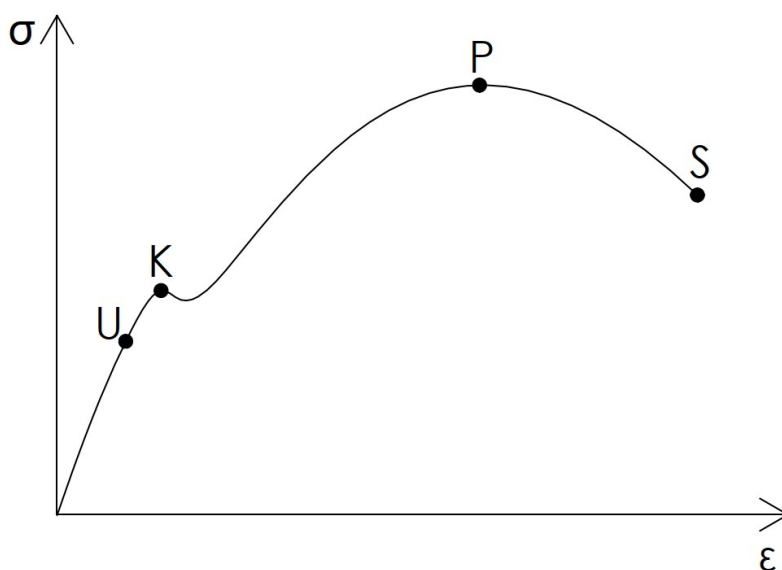
$$\epsilon = \frac{\Delta L}{L_0} \cdot 100 [\%] \quad 2.4$$

kde: ΔL – rozdíl počáteční a konečné délky [mm]

L_0 – počáteční délka [mm]



Obr. 2.6 Používané tvary vzorků [15].



Obr. 2.7 Deformační křivka [16].

Z výsledné křivky lze vyčíst změny chování vzorku, nejdříve dochází k lineárnímu nárůstu dle Hookova zákona až do meze úměrnosti (U). Další deformace je stále pružná a po odlehčení dochází k vrácení materiálu do původního tvaru. Tento stav platí do meze kluzu (K), v některých případech není patrná

a nahrazuje se smluvní mezí kluzu. Následná deformace je již trvalá, označuje se jako plastická. Dalším důležitým bodem na křivce je mez pevnosti (P), je to bod největšího napětí. Po překročení tohoto bodu začíná docházet k tvorbě krčku a zmenšení průřezu až do přetržení (S) [16].

Hookův zákon [15]

$$\sigma = E \cdot \epsilon \text{ [MPa]} \quad 2.5$$

kde: E – modul pružnosti v tahu [MPa]

2.3.3 Pevnost za vyšších teplot

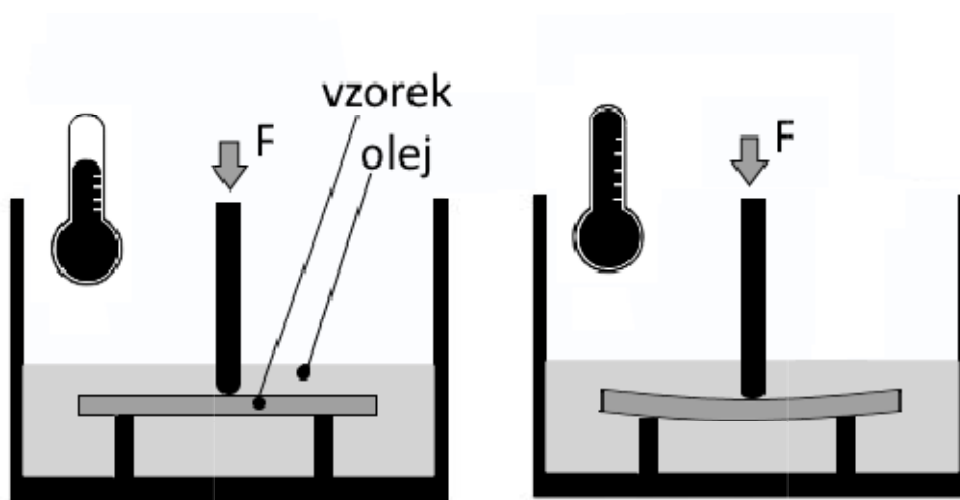
Stanovuje se teplota, při níž materiál začíná rychle měknout. Naměřené hodnoty se nemusí reflektovat praxi, protože jsou zde z pravidla jiné podmínky zatížení a délky vystavení vysoké teplotě. Používají se dvě metody [15]:

Stanovení teploty měknutí dle Vicata.

Během zkoušky je vlačována jehla s plochou špičkou do vzorku. Síla působící jehly je definována. Vzorek je zahříván konstantní rychlostí do momentu, kdy se jehla zaboří do hloubky 1 mm [15].

Stanovení teploty průhybu při zatížení.

Vzorek je namáhán na ohyb definovanou konstantní silou (viz obr. 2.8). Vzorek je zahříván rychlostí 120 °C za hodinu do momentu, kdy průhyb dosáhne hodnoty 0,25 mm. Pro lepší tepelnou vodivost je vzorek v lázni [16].



Obr. 2.8 Schéma stanovení teploty průhybu při zatížení [16].

2.4 Polymery

Problematika materiálů je obecně rozsáhlé téma, tato práce se bude zabývat jen základními vlastnostmi vybraných materiálů pro FDM tisk. Pro srovnání budou na konci kapitoly tabulky 2.1 a 2.2 s vybranými vlastnostmi jednotlivých materiálů. Hodnoty jsou jen orientační, protože každý výrobce má trochu jiný poměr jednotlivých složek materiálu, takže především mechanické vlastnosti mohou být rozdílné.

2.4.1 PLA

Polylactic acid, jedná se o biologicky odbouratelný materiál vyráběný z kukuřičného nebo bramborového škrobu, případně z cukrové třtiny [17]. PLA je neuniverzálnější materiál pro 3D tisk, mezi jeho přednosti patří tvrdost, snadný tisk, cena a nízká tepelná roztažnost. Nevýhodou tohoto materiálu je jeho nízká tepelná odolnost, kdy při teplotách nad 50 °C měkne, má také tendenci natahovat vzdušnou vlhkost [18]. Lze rozpustit pomocí hydroxidu sodného [17], nebo dlouhodobé vystavení acetonu může způsobit naleptání povrchu [18]. Existuje celá řada variant, například s příměsí dřeva, bronzu nebo železa [17,18]. Na trhu se dají najít dokonce i PLA struny svítící ve tmě nebo magnetické [17].

2.4.2 ABS

Akrylonitrilbutadienstyren je amorfní termoplastický polymer. Největší předností ABS je jeho tepelná a chemická odolnost, při zachování dobré tuhosti a pevnosti v tahu [17,18]. Lze jej rozpustit v acetonu [18]. Teplotám odolává do 100°C. Nevýhodou je velká tepelná roztažnost. Stejně jako v případě PLA existuje celá řada příměsí, které zlepšují vlastnosti tohoto materiálu [17,18].

2.4.3 PET

Polyethylentereftalát patří mezi nejpoužívanější plasty na světě, vyrábí se z něj například láhve, nádoby a obaly. Pro 3D tisk se používá většinou ve variantě PETG, který je modifikován glykolem, díky tomu je méně křehký a vhodnější k tisku. PETG je velmi houževnatý materiál s dobrou tepelnou odolností. Lze dobře recyklovat. Výhodná je i jeho velmi nízká tepelná roztažnost [17].

Tab. 2.1 Přehled vybraných vlastností plastů [19,20].

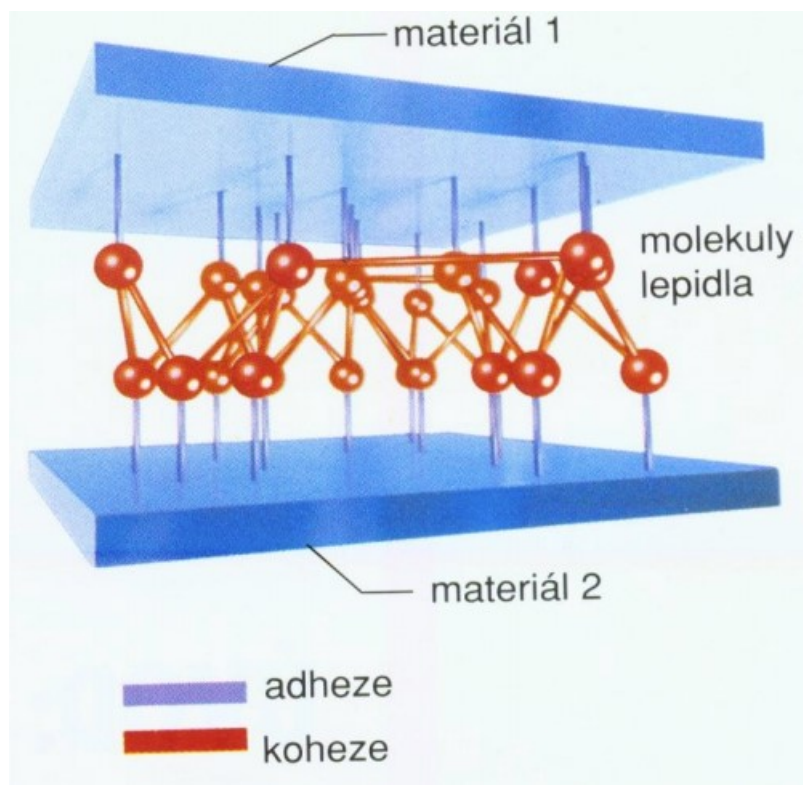
	Hustota [g/cm ³]	Houževnatost [kJ/m ²]	Pevnost v tahu [MPa]	Teplota průhybu [°C]
PLA	1.24	15	65	52
ABS	1.04	45	40	98
PETG	1.23	30	53	73

Tab. 2.2 Přehled vlastností plastů, důležitých pro tisk [19,20].

	Teplotní roztažnost [K ⁻¹ · 10 ⁶]	Teplota trysky [°C]	Teplota podložky [°C]
PLA	68	210-215	60
ABS	90	240-255	110
PETG	60	230-270	90

3 PRINCIP LEPENÍ

Lepením se vytváří pevné nerozebíratelné spojení dvou stejných nebo různorodých materiálů, aniž by došlo k jejich výraznému ovlivnění. K vytvoření spojení je nutné lepidlo, které přilne k lepeným materiálům. Faktory ovlivňující kvalitu lepeného spoje jsou adheze, koheze a smáčivost. Schéma tohoto spojení je na obrázku 3.1 [21].



Obr. 3.1 Schéma principu lepení [21].

3.1 Srovnání s dalšími metodami

Mezi konvenční metody spojování polymerů, kromě lepení, patří svařování a mechanické metody, sem patří například nýtování nebo šroubování. V případě mechanických metod je nutné provést konstrukční změny a nejedná se o metodu, která by mohla přímo nahrazovat lepení [22].

Svařování plastů je technologie tvořící nerozebíratelný spoj působením tepla, tlaku nebo obou. Během svařování dochází k roztavení materiálu v kontaktních plochách, z toho důvodu je metoda vhodná pouze pro termoplasty, které lze přídatným teplem převést do plastického stavu [22]. V praxi se používá celá řada metod svařování, lze je rozdělit podle způsobu dodání tepla na [23]:

- vedením,
- prouděním,
- zářením,
- třením.

Výhody lepení oproti jiným metodám [24]:

- vhodné pro tenké plechy, které nelze nýtovat, ani svařovat,
- vhodné pro různé materiály, například pryž,
- nedochází k tepelnému namáhání,
- konstrukčně jednoduché,
- tlumí vibrace a hluk,
- rovnoměrně rozložené zatížení,
- elektrický izolant.

Nevýhody [24]:

- nutnost očištění stykových ploch,
- složitá demontáž,
- nevhodné do agresivního prostředí,
- nevhodné pro vyšší provozní teploty,
- nemožnost recyklace,
- časová náročnost procesu.

3.2 Adheze

Adheze je definována jako přilnavost dvou různých materiálů. V případě lepení se jedná o přilnavost mezi lepidlem a lepeným materiálem. Pro popis adheze existuje několik teoretických modelů [25]:

Mechanická teorie – platí pouze v případě členitého povrchu, kdy dochází k zatečení a následnému zatuhnutí lepidla v trhlinách a pórech.

Elektrostatická teorie – adheze vzniká na základě elektrostatických sil na rozhraní lepidla a materiálu, podobný princip jako v případě kondenzátoru.

Difúzní teorie – vychází z předpokladu vzájemné difúze.

Teorie chemických vazeb – opírá se o vznik chemických vazeb na rozhraní lepidla a lepeného materiálu.

Adsorpční (termodynamická) teorie – předpokládá vznik spoje prostřednictvím mezimolekulárních interakcí typu Van der Waalsových mezimolekulárních sil.

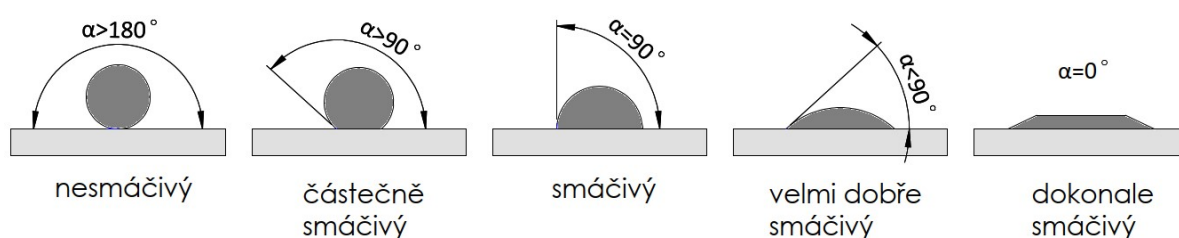
3.3 Koheze

Koheze, nebo také soudržnost, vyjadřuje pevnost vrstvy lepidla, souvisí s mezimolekulárními a valenčními silami ve struktuře lepidla. Míru energie potřebné k oddělení částic lepidla od sebe se označuje jako kohezní energie. Soudržnost závisí na pevnosti lepidla a tepelném namáhání [25].

3.4 Smáčivost

Ke vzniku adheze je důležité, aby došlo k rovnoměrnému rozprostření lepidla, tedy smáčivost, je to schopnost kapaliny přilnout k jinému povrchu (viz obr. 3.2). Úhel smáčivosti se označuje jako α . Důležitými parametry jsou polarita lepeného povrchu a povrchové napětí lepidla a povrchu. Lepidla jsou polární látky, to znamená, že jsou jednostranně elektricky orientovány. Dobře smáčí polární povrchy, jako například dřevo, přírodní textilie a sklo, naopak špatně smáčí některé plasty a syntetický textilie [26]. Smáčivost vybraných materiálů je v tabulce 3.1.

Polarita povrchů látek je příčinou vzniku povrchové energie, která se vyjadřuje jako povrchové napětí. S hodnotou povrchového napětí roste i polarita povrchu. Aby došlo k smočení povrchu je nutné vyšší povrchové napětí u kapaliny než u pevného povrchu. V případě špatného smočení vytváří kapalina kuličku [26].



Obr. 3.2 Smáčivost lepidel [21].

Tab. 3.1 Smáčivost vybraných materiálů [21].

Typ látky	Materiál	Povrchové napětí [$\text{mN} \cdot \text{m}^{-1}$]
Polární látky	Celulóza	>70
	Železo	60
	PVC	42
Nepolární látky	Polyetylen	25
	Polypropylen	31
	Silikon	<20
	Teflon	<20
Kapaliny	Voda	73
	Voda + saponát	24-40
	Toluen	28
	Ethanol	23

3.5 ROZDĚLENÍ LEPIDEL

V současné době existuje celá řada lepidel, které lze dělit podle nejrůznějších hledisek a vlastností:

Podle způsobu tuhnutí [27]:

- lepidla tuhnoucí
 - vypařováním vody
 - disperzní
 - roztoková
 - odtěkáním rozpouštědel
- lepidla reaktivní tuhnoucí
 - vlivem teploty
 - vlivem vlhkosti
 - kontaktem s kovy
 - přidáním tvrdidel
- lepidla tavná
- lepidla stále lepivá

Podle chemické struktury [24]:

- anorganická
- na bázi silikonu
- organická
 - přírodní
 - semisyntetická
 - syntetická

Podle fyzikální podstaty [24]:

- kapalná
- plastická
- tuhá

Mezi další parametry, podle kterých lze lepidla dělit, můžeme zařadit například tepelné vlastnosti, odolnost ve vodě nebo podle počtu složek [25].

Lepidla tuhnoucí vypařováním vody nebo jiných rozpouštědel

Bývají také označovány jako nereaktivní lepidla, hlavní složkou je polymerní filmotvorná látka, která je rozpuštěná nebo dispergovaná ve vodě nebo jiném

rozpouštědla. K tuhnutí dochází vypařováním rozpouštědla, proto je nutné, aby alespoň jeden z lepených materiálů byl propustný pro plyn [27].

Lepidla reaktivní

K vytvrzení reaktivních lepidel dochází především díky chemické reakci uvnitř lepidla nebo s lepeným materiálem. Jedná se zpravidla o jednosložkové nebo dvousložkové systémy. Do skupiny dvousložkových lepidel patří epoxidová lepidla, která se vytvrzují smícháním tvrdidla a plniva. Mezi lepidla jednosložková patří například kyanoakrylátová (vteřinová) lepidla, v jejich případě dochází k tuhnutí vlivem vlhkosti, epoxidová lepidla vytvrditelná teplem, kdy druhá složka je vmíchána do báze a uvolní se po dosažení určité teploty. Lepidla reaktivní mívají zpravidla vyšší pevnost [28].

Lepidla tavná

Za běžné teploty se jedná o látky v pevném stavu a pro účely lepení se roztaví a nanášou na lepený povrch. Vytvrzení nastává po zchladnutí [27].

Lepidla stále lepidivá

Označují se také jako lepidla se samolepícím účinkem, jsou stále vláčná a lepidivá. K jejich využití je nutné je nanést na vhodný nosič může se jednat o pásy nebo fólie [27].

3.6 Technologický postup lepení

Postup lepení se skládá z pěti fází v závislosti na různých faktorech, některé kroky nejsou nutné a k zajištění kvalitního lepeného spoje se nevyžadují [22].

Prvním krokem je příprava povrchu lepeného materiálu, provádí se za účelem zvýšení smáčivosti a ke zlepšení adhezních vazeb. Kvalitu lepeného spoje negativně ovlivňuje přítomnost nečistot, nerovností a koroze. Důležitým faktorem je velikost lepené plochy, kdy s velikostí plochy roste i množství vazeb a s tím spojená pevnost [22]. Způsob povrchové úpravy se volí především podle druhu a stavu lepeného materiálu a druhu lepidla. Dále záleží také na požadavcích na lepený spoj a výrobní náklady, je zde i ekologické hledisko především v případě některých chemických metod. Za určitých podmínek je možné lepit i bez přípravy povrchu, například lepení plastů, které jsou čisté a nejsou na ně kladeny velké nároky při použití akrylátových nebo rozpouštědlových lepidel [29]. Příprava povrchu může být založena na fyzikálním principu, jako třeba broušení, pískování, ultrazvukové čištění, polarizace oxidačním plamenem, sušení a ozařování UV zářením nebo mohou být založeny na chemickém principu, sem patří například odmašťování, použití nátěrů, primerů, moření a anodická oxidace [22,29].

Dalším krokem je příprava lepidla, ve většině případů se lepidla prodávají již připravená, výjimku tvoří vícesložková lepidla, v tomto případě se postupuje podle doporučení výrobce [22].

Následuje nanášení lepidla, kdy je důležité pro kvalitní spoj dosáhnout souvislé a rovnoměrné vrstvy lepidla. Toho lze dosáhnout ručně za pomoci různých

aplikátorů, štětců, stěrek, válečků a vytlačovacích pistolí nebo strojně například s použitím polévacího zařízení, nanášení s využitím trysek nebo zařízení s natíracím nožem a válcem [22].

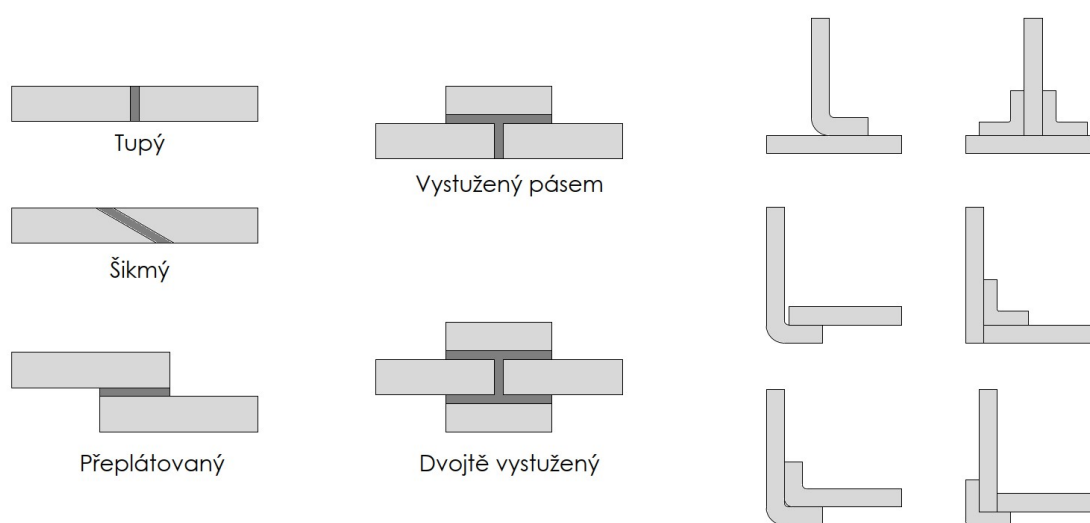
Předposledním krokem je montáž lepených dílů, kdy je nutné přesně spojit lepené díly, například pomocí přípravku. Fixace musí proběhnout v montážní době, dříve než dojde k ztvdnutí lepidla. Během fixace musí působit na lepený povrch tlak k zajištění požadované tloušťky a k proniknutí lepidla do pórů. Pokud bude tlak příliš vysoký, může dojít k vytečení lepidla ze spoje [22].

Poslední fází je vytvrzení, lepený spoj je vytvořený, ale aby získal požadované vlastnosti je nutné spoj vytvrdit. Tento proces závisí na použitém lepidle, může k němu docházet za studena, tedy za pokojové teploty nebo za zvýšené teploty [22].

3.7 Návrh lepeného spoje

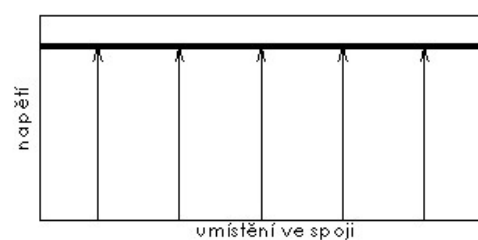
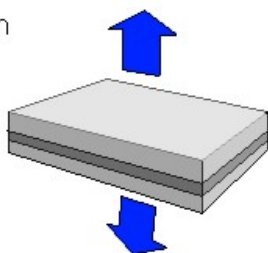
Při návrhu lepeného spoje je důležitá především volba vhodného lepidla. Zvolené lepidlo musí vytvořit s lepenými materiály adhezní spojení. Dalšími faktory ovlivňujícími volbu lepidla jsou požadavky na spoj, jako je například chemická odolnost, pevnost nebo tlumení vibrací [30].

Dalším důležitým faktorem je konstrukce lepeného spoje, na obrázku 3.3 jsou ukázány některé příklady. Tato konstrukční řešení lze dále kombinovat. Mezi nejběžnější provedení spoje patří jednoduchý přeplátovaný spoj. Při volbě vhodného konstrukčního řešení je důležitý způsob namáhání spoje. Nejvhodnější způsob namáhání je smykové, oproti tomu nejméně vhodné je odlupování. Na obrázku 3.4 jsou znázorněny typy namáhání a průběh napětí [21]. Další zásadou je snaha o rovnoměrné zatížení po celé ploše spoje, aby nedocházelo ke koncentraci napětí. Také je vhodné vyhnout se složitě zakřiveným plochám. Pevnost spoje také závisí na velikosti plochy lepeného spoje, tohoto lze dosáhnout například změnou tupého čelního spoje za seříznutý spoj. Při návrhu lepeného spoje je možná kombinace lepení s jinou technologií, například s nýtováním [3].

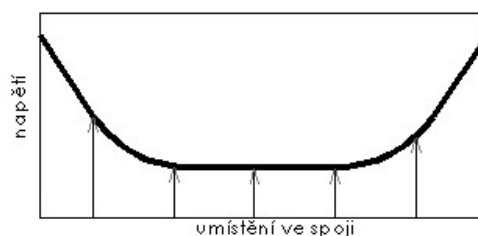
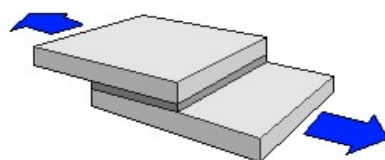


Obr. 3.3 Řešení plochých a koutových spojů [21].

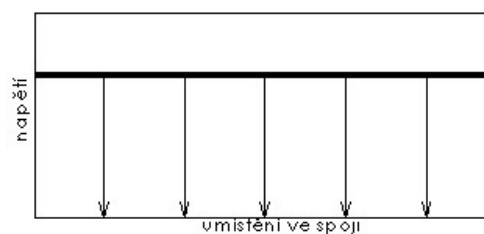
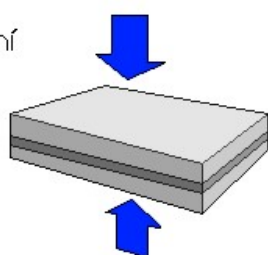
namáhání tahem



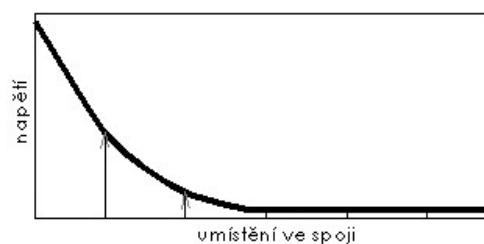
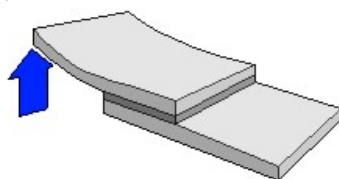
namáhání smykem



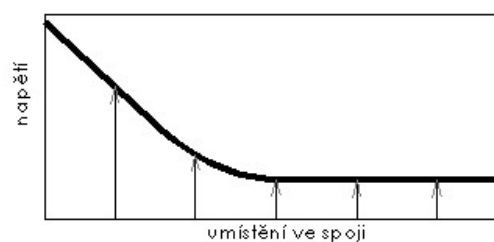
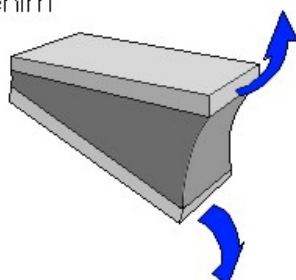
tlakové zatížení



namáhání loupáním



namáhání štěpením



Obr. 3.4 Průběh napětí u různých typů namáhání [21].

4 ZKOUŠKY LEPENÝCH SPOJŮ

Pro posouzení vhodnosti lepidel pro různé aplikace slouží celá řada zkoušek hodnotících různé druhy namáhání. Základní rozdělení je na zkoušky destruktivní a nedestruktivní. Do nedestruktivních zkoušek patří defektoskopie sloužící k odhalení skrytých vad, například za pomoci ultra zvuku. Destruktivní zkoušky lze dále dělit na [25,31]:

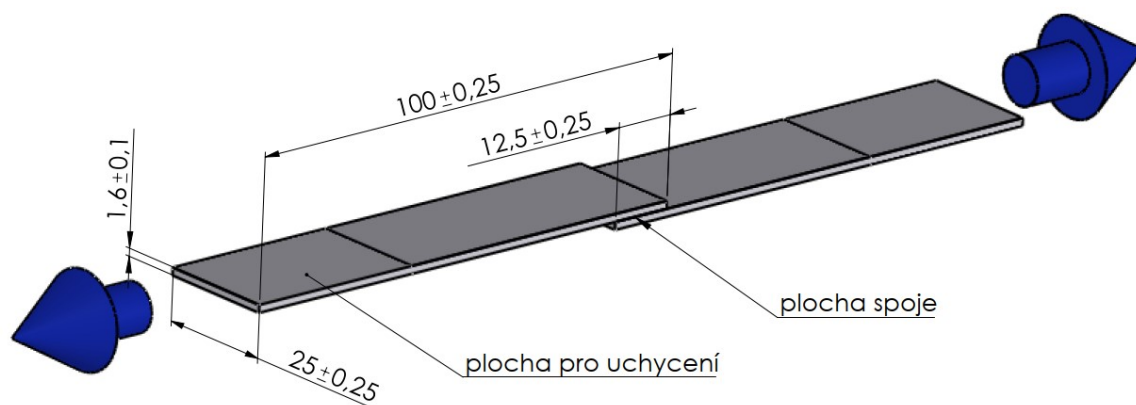
- Zkoušky pevnostní
 - o Statické
 - pevnosti v tahu nebo tlaku
 - pevnosti ve smyku
 - odlupování
 - lámavosti
 - o Dynamické
 - namáhání rázem
 - únavová zkouška
- Zkoušky stárnutí – zkoumají vliv teploty, vlhkosti, UV záření a prostředí na dlouhodobou odolnost

4.1 Zkouška pevnost v tahu

Touto zkouškou se zabývá norma ČSN EN 15870. Podstatou zkoušky je namáhání lepeného spoje na tah, vzorek je tvořen dvěma adherendy, které jsou vzájemně slepené. Adherendem je tyč která by měla být kruhového nebo čtvercového průřezu, také platí, že oba adherendy musí být ze stejného materiálu a mít stejné rozměry. Zkouška se provádí na zařízení, které umožňuje rovnoměrné zvyšování tlakové síly, a zaznamenávají sílu potřebnou k přetržení vzorku. Pro každé lepidlo je nutné provést zkoušku alespoň pětkrát. Výsledkem zkoušky je protokol, který obsahuje informace o vzorku, použitém lepidle, přípravě a průběhu zkoušky. Dále obsahuje výsledky zkoušky například průměrnou sílu při přetržení, rozptyl, průměrnou tloušťku lepidla, množství lepidla a typ porušení vzorku [32].

4.2 Zkouška pevnosti ve smyku

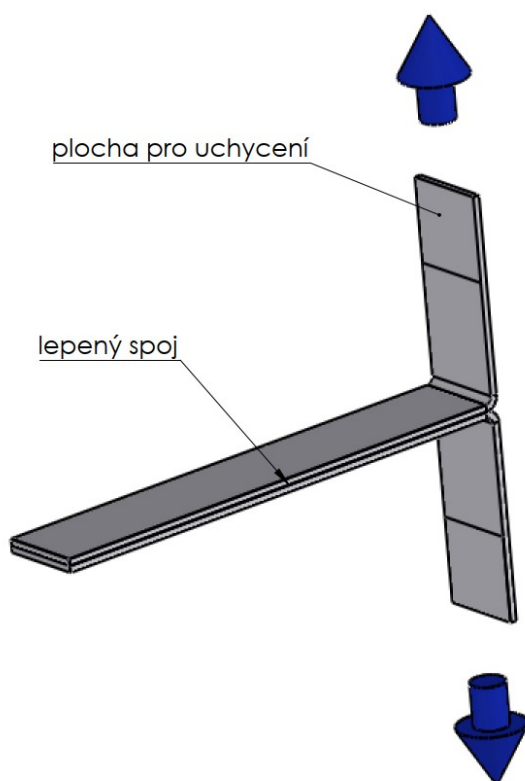
Touto zkouškou se zabývá norma ČSN EN 1465. Zkouška pro hodnocení pevnosti lepeného spoje při smykovém namáhání. Vzorek se skládá ze dvou přeplátovaných těles (viz obr. 4.1). Na zkušební zařízení jsou kladeny podobné podmínky jako v případě zkoušky pevnosti v tahu. Další podobností s tahovou zkouškou je nutnost provést pro každé lepidlo zkoušku vícekrát, a také platí, že výstupem zkoušky je protokol [33].



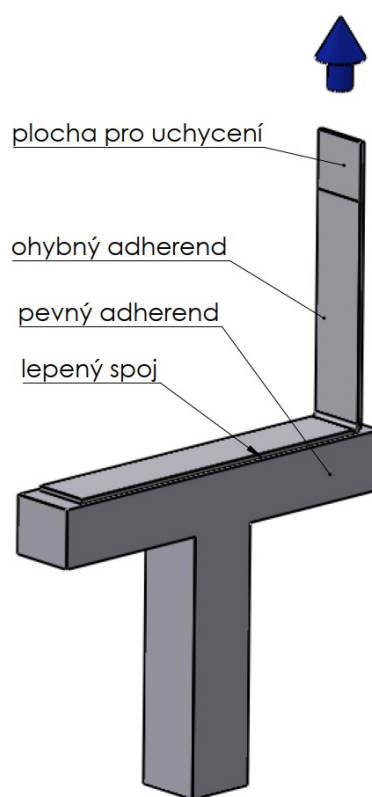
Obr. 4.1 Zkouška pevnosti ve smyku [33]

4.3 Zkouška odlupování

Podstata zkoušky je v postupném odlupování dvou adherendů, přibližně stabilní rychlosti. Měří se maximální, minimální a průměrná síla. Do zkoušek odlupování patří T-zkouška dvou ohebných adherendů (viz obr. 4.2) nebo zkouška odlupování ohebného a tuhého adherendu, kterou lze dále rozdělit na odlupování pod úhlem 90 stupňů (viz obr. 4.3) nebo 180 stupňů [34,35,36].

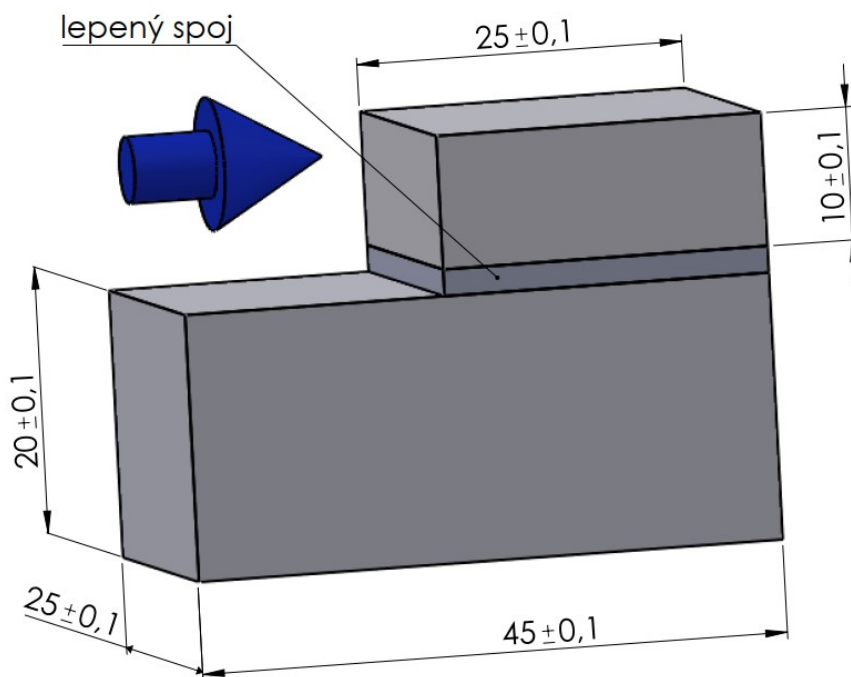


Obr. 4.2 T-zkouška [34]

Obr. 4.3 Zkouška odlupování
pod úhlem 90 ° [35]

4.4 Rázová zkouška

Rázovou zkouškou lepených spojů se zabývá norma ČSN EN ISO 9653, jedná se o zkoušku dvou adherendů z kovu nebo dřeva. Během zkoušky se využívá kyvadlového kladiva k porušení lepeného spoje, zaznamená se potřebná energie. Pokud nedojde k porušení vzorku, zkouška se opakuje s menším vzorkem. Tvar vzorku je znázorněn na obrázku 4.4. Minimální počet kovových vzorků je deset a dřevěných je dvacet [37].

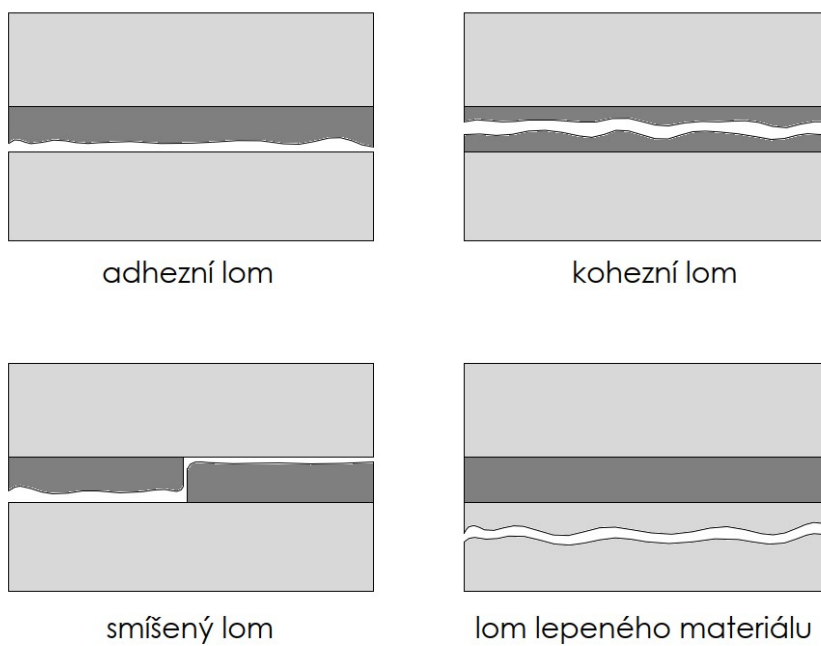


Obr. 4.4 Rázová zkouška [37]

4.5 Poruchy lepených spojů

Kromě stanovení pevnosti nebo jiného parametru při určitém druhu namáhání je také nutné popsat způsob porušení lepeného spoje (viz obr. 4.5). Může nastat [24]:

- Adhezní lom – k porušení spoje dochází v adhezní oblasti. Pokud dojde k tomuto typu lomu, může to znamenat špatné opracování povrchu nebo nevhodně zvolené lepidlo pro daný materiál.
- Kohezní lom – k lomu dojde v samotném lepidle. Kohezní pevnost lze zvýšit co nejtenčí vrstvou lepidla.
- Smíšený lom – způsobuje ho kombinace poruch v adhezní a kohezní oblasti, jedná se o poměrně častou poruchu.
- Lom lepeného materiálu – může nastat i situace, kdy lepený spoj je pevnější než jeden z lepených dílů.



Obr. 4.5 Typy lomů [24]

5 EXPERIMENT

Pro účely práce byly k ověření mechanických vlastností zvoleny dvě zkoušky a to v tahu a ve smyku. Dále byla vytipována lepidla LOCTITE 406, KAVAN PRO, UHU Plast Special, Alteco 3-Ton Clear a BISON POWER ADHESIVE.

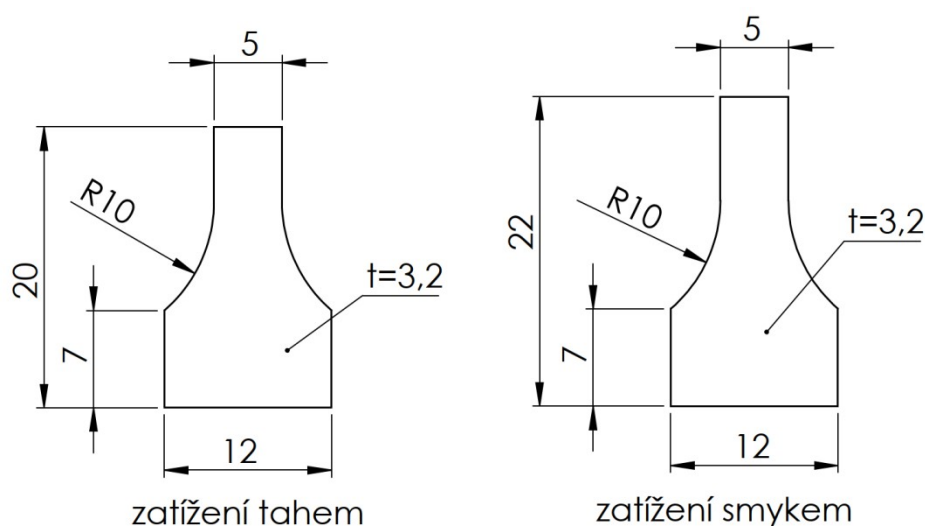
Samotný experiment se skládal z přípravy vzorků, tedy jejich vytištění, případné úpravě povrchu, slepení a vytvrzení. Následně byla provedena destruktivní zkouška a její vyhodnocení. Postup byl obdobný pro obě zkouškové metody.

5.1 Popis zkoušky

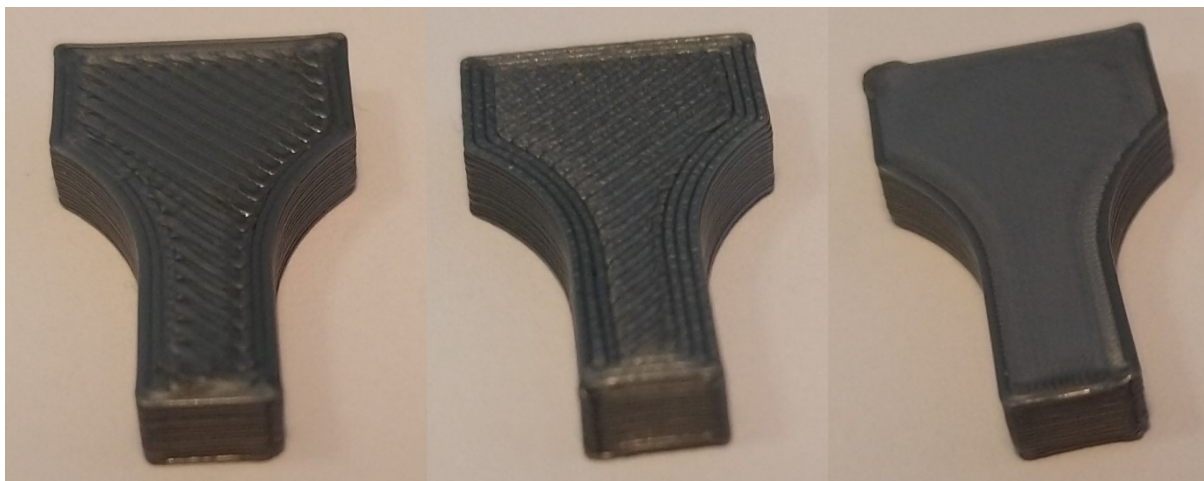
Vzorky byly testovány na experimentálním trhacím zařízení. Toto zařízení mělo několik omezení, především dosahovalo maximální trhací síle 500 N, z toho důvodu byly zvoleny menší vzorky. Zařízení také nezaznamenávalo průběh napětí nebo deformace, ale pouze zaznamenávalo maximální napětí. Výhodou bylo využití speciální formy k upínání vzorků, do které se vzorky pouze vkládali. Zařízení splňovalo potřebné požadavky pro experiment a umožňovalo jeho rychlé provedení a s tím související vyšší počet testovaných vzorků.

Tvar a rozměry testovaných vzorků lze vidět na obrázku 5.1. Jako materiál byl zvolen PLA od firmy Filament PM ve stříbrném provedení, průměr struny je 1,75 mm. Byla zvolena výška vrstvy 0,2 mm a 95% výplň metodou recalinear.

V případě vzorků pro zkoušku ve smyku bylo přihlédnuto k faktu, že vliv na pevnost může mít i provedení povrchu, z toho důvodu při zkoušce jsou rozeznávány tři druhy povrchů (viz obr. 5.2) a to povrch finální vrstvy (A), povrch vzniklý kontaktem s podložkou (B) a vyhlazený povrch (C), jedná se o úpravu finální vrstvy, kterou umožňuje tiskárna.



Obr. 5.1 Tvar a rozměry vzorků

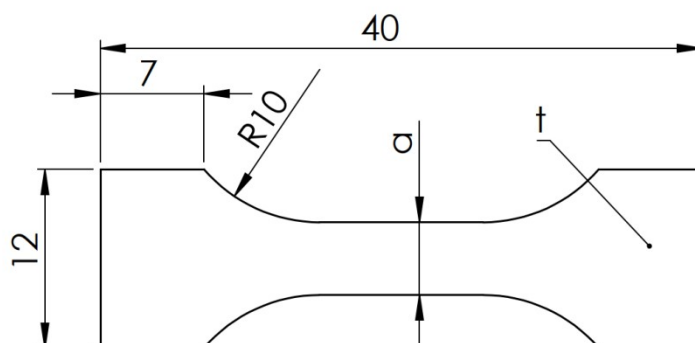


Obr. 5.2 Vzhled povrchu

Kromě vzorků pro zkoušku lepených spojů byly také vytištěny nelepené vzorky k porovnání. Na obrázku 5.3 fotografie dílu a na obrázku 5.4 tvar a rozměry dílu. Bylo navrženo několik variant nelepených vzorků, které se liší šířkou a tloušťkou, jak je znázorněno na obrázku. Vzhledem k charakteru tisku tohoto nelze dosáhnout u zkoušky pevnosti ve smyku.



Obr. 5.3 Tvar a rozměry nelepených vzorků



Obr. 5.4 Tvar a rozměry nelepených vzorků

5.2 Použitá lepidla

Pro zkoušku bylo zvoleno pět různých lepidel, u kterých se předpokládá, že jsou vhodná k lepení plastů. Pro komplexnější srovnání byly mezi zvolenými lepidly dva zástupci kyanoakrylátových lepidel. Mezi parametry při volbě vhodného lepidla bylo přihlédnuto i k ceně výrobku.

Před lepením byly všechny vzorky očištěny a odmaštěny za použití přípravku LOCTITE SF 7070. Jedná se o rozpouštědlový čistič a odmašťovač plastů určený pro většinu plastových součástí. Doba schnutí je 60 sekund.

LOCTITE 406

Kyanoakrylátové lepidlo LOCTITE 406 je přednostně určeno k lepení plastických hmot. Vyznačuje se velmi nízkou dobou fixace a nízkou viskozitou. Teplotní odolností od -40 °C do 120 °C. Před použitím byl použit aktivátor LOCTITE SF 7455. Před uvedením lepeného dílu do provozního zatížení se doporučuje nechat produkt vytvrdit 24 až 72 hodin [38].

KAVAN PRO

Vteřinové lepidlo se střední viskozitou. Pro lepení dřeva, kovů, většiny plastů. Pracovní doba 7-10s, pevný spoj 20-30s. Plné vytvrzení za 24 hodin. Před použitím byl použit aktivátor KAVAN PRO CA [39].

UHU plast Special

Mimořádně kvalitní, rychleschnoucí, vodovzdorné, transparentní lepidlo určené pro lepení plastů, je také vhodné k lepení plastů se dřevem, kartonem nebo papírem. UHU plast special dosahuje vysokých pevností rozpuštěním povrchů plastů (studené svařování). Manipulační pevnosti se dosahuje za 5 minut a funkční pevnosti do 24 hodin [40].

Alteco 3-Ton Clear

Číré dvousložkové epoxidové lepidlo s vysokou pevností. Vhodné pro lepení mimo jiné kovů, dřeva, tvrdých plastů, laminátu, keramiky, porcelánu, skla, betonu, kamene, gumy a pěnového polystyrenu. Tepelná odolnost od -10 °C do 120 °C. Manipulační pevnosti dosahuje za 20 minut a vytvrzení do 24 hodin [41].

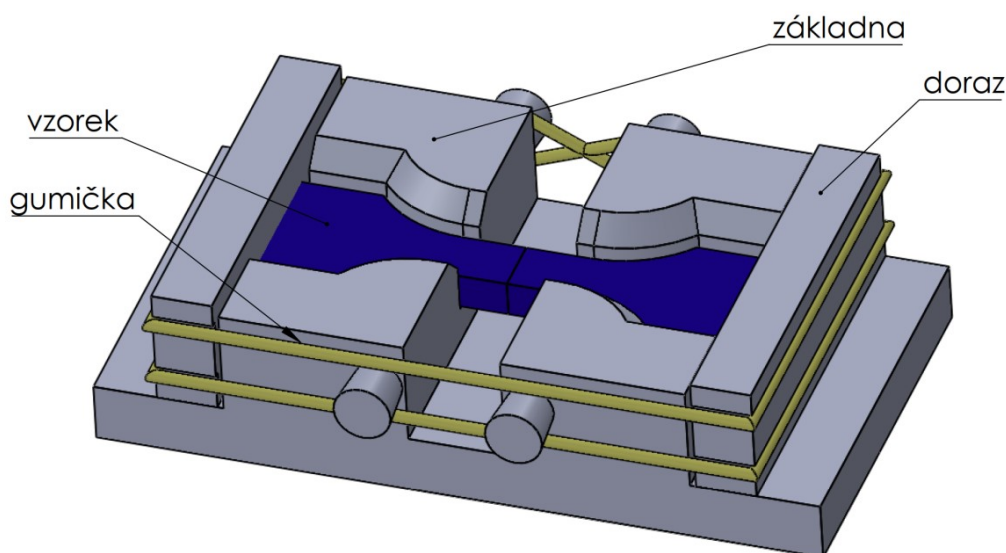
Bison Power Addhesive

Dvousložkové polyuretanové lepidlo s velmi vysokou pevností, je vhodné k lepení syntetických látek, kovů, mramoru, skla a většiny plastů. Není vhodné pro PE, PP, PTFE a silikony. Teplotní odolností od -30 °C do 100 °C. Spojení je odolné po hodině a maximální pevnosti dosahuje po 48 hodinách [42].

5.3 Přípravky

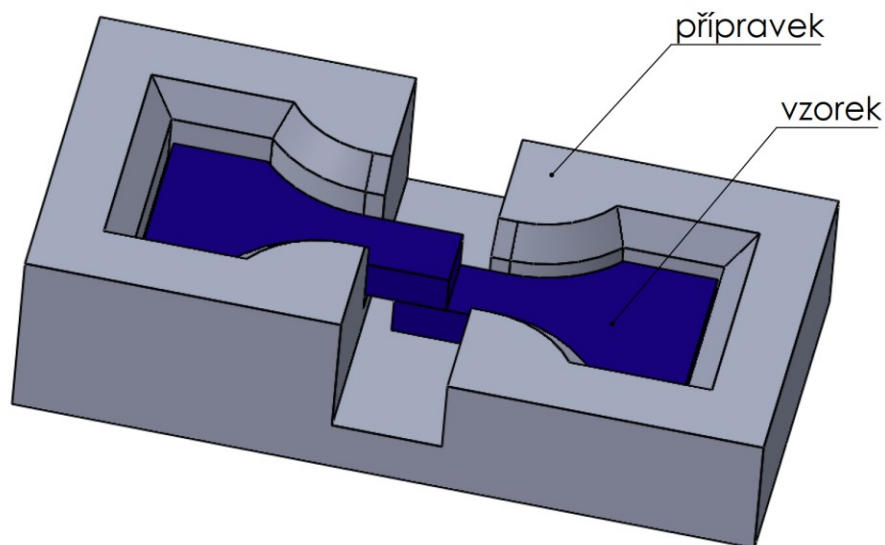
Provedení tohoto experimentu vyžaduje velké množství dílů, které je nutné slepit v dostatečné přesnosti. Dále musí být zafixované vůči sobě, v případě lepidla Bison Power Addhesive se jedná minimálně o hodinu, než dojde k dosažení dostatečné pevnosti. Naopak při lepení kyanoakrylátovými lepidly vytvrzení lepeného spoje dochází velice rychle, proto je nutné, aby díly mohly být zafixovány dostatečně rychle. Byly navrženy dva přípravky jeden na díly pro tahovou zkoušku a pro zkoušku na smyk.

Přípravek pro zkoušku tahem se skládá z několika dílů, model včetně popisu dílů lze vidět na obrázku 5.5. Základna a dorazy byly vytištěny na 3D tiskárně, jako materiál byl zvolen PLA. K vytvoření tlaku na lepený spoj byla použita gumička. Důležitým prvkem na základně je prostor na lepený spoj, který musí být dostatečně velký, aby nedošlo k přilepení vzorku k přípravku. Základna má také několik otvorů pro vyhazovač, aby bylo možné vzorek vyhodit a nedošlo k jeho zapříčení v přípravku.



Obr. 5.5 Přípravek na vzorky namáhané na tah

Druhý přípravek (viz obr. 5.6) je vytištěný jako samostatný díl. Použitý materiál byl PLA. K vytvoření tlaku mezi díly bylo použito závaží, případně gumička. Stejně jako první přípravek i tento má dostatečně velký prostor pro lepený spoj a otvory pro vyhazovač.



Obr. 5.6 Přípravek na vzorky namáhané na smyk

5.4 Vyhodnocení zkoušky pevnosti v tahu

Pro každé lepidlo bylo vytvořeno 10 zkušebních vzorků, některé z nich se nebylo možné pro zkoušku použít a některé vzorky byly vyjmuty z výpočtů, protože u nich byla naměřena nízká pevnost, pravděpodobně došlo ke špatnému očištění povrch nebo nastala jiná chyba. Vyřazené vzorky byly v tabulkách označeny šedou barvou.

Aby bylo možné výsledky měření porovnat bylo nutné po provedené zkoušce přepočítat maximální zatížení na pevnost v tahu, za tímto účelem byl použit vzorec 5.1. K dosazení bylo potřeba nejdříve vypočítat plochu lepeného spoje v tahu dle vzorce 5.2.

$$\tau_t = \frac{F}{S_t} [MPa] \quad 5.1$$

kde: τ_t – pevnost v tahu [MPa]

F – působící síla [N]

S_t – plocha lepeného spoje pro tah [mm²]

$$S_t = a \cdot b [mm^2] \quad 5.2$$

kde: S_t – plocha lepeného spoje pro tah [mm²]

a – výška vzorku [mm]

b – šířka vzorku [mm]

Aby bylo možné porovnat jednotlivá lepidla, byl vypočítán aritmetický průměr pevnosti v tahu, dle vzorce 5.3 a směrodatná odchylka, dle vzorce 5.4. Dále byl vypočítán konfidenční interval pro interval spolehlivosti s 95% pravděpodobností

dle vzorce 5.5. Konfidenční interval není nezbytně nutný k porovnání výsledků, ale umožňuje vytvořit si lepší představu o výsledných hodnotách. K výpočtu konvenčního intervalu byla použita T-distribuce neboli Studentova distribuce.

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n x_i \quad 5.3$$

kde: \bar{x} – aritmetický průměr

n – počet hodnot

x_i – hodnota měření

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \cdot \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad 5.4$$

kde: s – směrodatná odchylka

\bar{x} – aritmetický průměr

n – počet hodnot

x_i – hodnota měření

$$I = \bar{x} \pm t_{1-\frac{\alpha}{2}; n-1} \cdot \frac{s}{\sqrt{n}} \quad 5.5$$

kde: I – konfidenční interval

$t_{1-\frac{\alpha}{2}; n-1}$ – kvantil studentova rozdělení

\bar{x} – aritmetický průměr

s – směrodatná odchylka

n – počet hodnot

Pro každé lepidlo byla vytvořena tabulka s naměřenými a přepočítanými hodnotami, její součástí je i sloupec druh lomu, v rámci tohoto řádku byly použity zkratky:

- M – k porušení došlo v materiálu
- K – k porušení došlo v kohezní oblasti
- A – k porušení došlo v adhezní oblasti
- S – smíšený lom
- Z – nebylo možné provést měření

LOCTITE 406

Naměřené hodnoty pro lepidlo LOCTITE 406 jsou v tabulce 5.1, obrázek 5.7 znázorňuje vypočítané hodnoty a na obrázku 5.8 je ukázán vzorek 7.

Tab. 5.1 Naměřené hodnoty pro LOCTITE 406.

Číslo vzorku [-]	Maximální zatížení [N]	Pevnost v tahu [MPa]	Druh lomu	Rozměr [mm]	
				a	b
1	177.8	11.11	K	5	3.2
2	372.6	24.53	K	4.9	3.1
3	82.1	5.3	K	5	3.1
4	278.6	17.97	K	5	3.1
5	281.2	17.58	K	5	3.2
6	269.8	16.86	K	5	3.2
7	368.9	22.6	K	5.1	3.2
8	436.2	27.06	K	5.2	3.1
9	353.6	22.1	K	5	3.2
10	321.7	20.75	K	5	3.1

Vzorový výpočet plochy lepeného spoje:

$$S_t = a \cdot b$$

$$S_t = 4,9 \cdot 3,1 = 15,19 \text{ mm}^2$$

Vzorový výpočet pevnosti v tahu:

$$\tau_t = \frac{F}{S_t}$$

$$\tau_t = \frac{372,6}{15,19} = 24,53 \text{ MPa}$$

Výpočet aritmetického průměru, pro pevnost v tahu:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n x_i$$

$$\bar{x} = \frac{1}{8} \cdot \sum_{i=1}^8 x_i = \frac{24,53 + 17,97 + 17,58 + 16,86 + 22,6 + 27,06 + 22,1 + 20,75}{8} = 21,2 \text{ MPa}$$

Výpočet směrodatné odchylky, pro pevnost v tahu byl proveden v programu Microsoft Excel.

$$s = 3,6$$

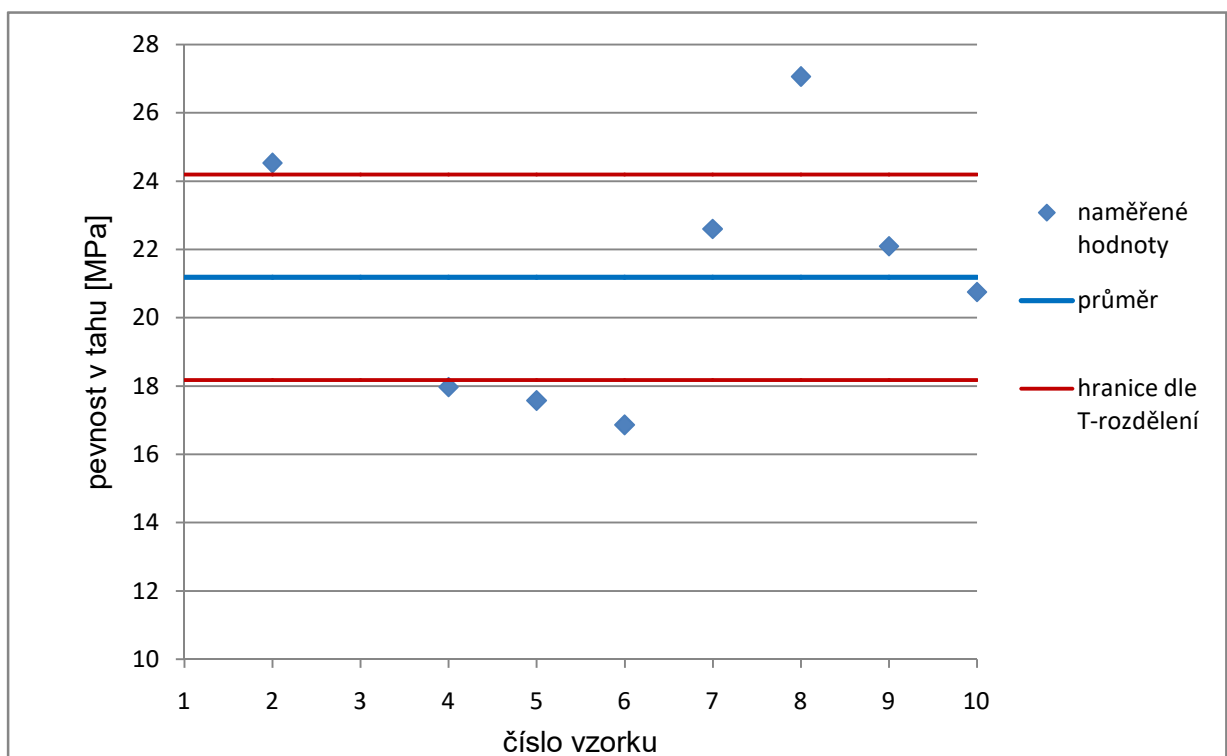
Hodnota $t_{0,975;7}$ byla vypočítána pomocí programu Microsoft Excel:

$$t_{0,975;7} = 2,364$$

Výpočet konfidenčního intervalu, pro pevnost v tahu:

$$I = \bar{x} \pm t_{1-\frac{\alpha}{2};n-1} \cdot \frac{s}{\sqrt{n}}$$

$$I = \bar{x} \pm t_{0,975;7} \cdot \frac{s}{\sqrt{n}} = 21,2 \pm 2,364 \cdot \frac{3,6}{\sqrt{8}} = 21,2 \pm 3 \text{ MPa}$$



Obr. 5.7 Grafické znázornění výsledků pro LOCTITE 406.



Obr. 5.8 Vzorek číslo 7.

KAVAN PRO

Naměřené hodnoty pro lepidlo KAVAN PRO jsou v tabulce 5.2, obrázek 5.9 znázorňuje vypočítané hodnoty a na obrázku 5.10 je ukázán vzorek číslo 15 z pohledu mikroskopu, u tohoto vzorku došlo k odtržení přední části obvodové vrstvy.

Tab. 5.2 Naměřené hodnoty pro KAVAN PRO.

Číslo vzorku [-]	Maximální zatížení [N]	Pevnost v tahu [MPa]	Druh lomu	Rozměr [mm]	
				a	b
11	227.7	15.49	K	4.9	3
12	439	28.32	K	5	3.1
13	355.7	23.42	K	4.9	3.1
14	495	32.59	M	4.9	3.1
15	464.3	30.23	M	4.8	3.2
16	473.9	29.6	M	5	3.2
17	316.5	19.78	K	5	3.2
18	377.5	24.35	K	5	3.1
19	417.3	26.61	K	4.9	3.2
20	479.5	29.97	K	5	3.2

Vzorový výpočet plochy lepeného spoje:

$$S_t = a \cdot b$$

$$S_t = 5 \cdot 3,1 = 15,5 \text{ mm}^2$$

Vzorový výpočet pevnosti v tahu:

$$\tau_t = \frac{F}{S_t}$$

$$\tau_t = \frac{439}{15,5} = 28,32 \text{ MPa}$$

Výpočet aritmetického průměru, pro pevnost v tahu:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n x_i$$

$$\bar{x} = \frac{1}{9} \cdot \sum_{i=1}^9 x_i = \frac{28,32 + 23,42 + 32,59 + 30,23 + 29,6 + 19,78 + 24,35 + 26,61 + 29,97}{9} = 27,2 \text{ MPa}$$

Výpočet směrodatné odchylky, pro pevnost v tahu byl proveden v programu Microsoft Excel.

$$s = 4,04$$

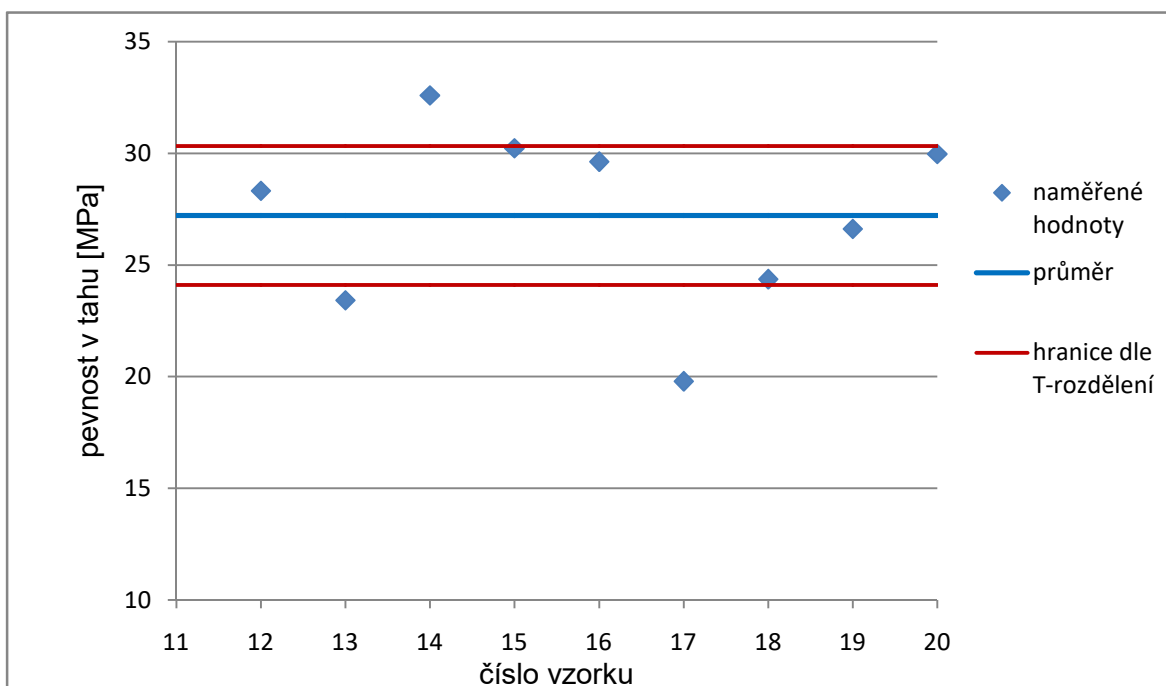
Hodnota $t_{0,975;8}$ byla vypočítána pomocí programu Microsoft Excel:

$$t_{0,975;8} = 2,306$$

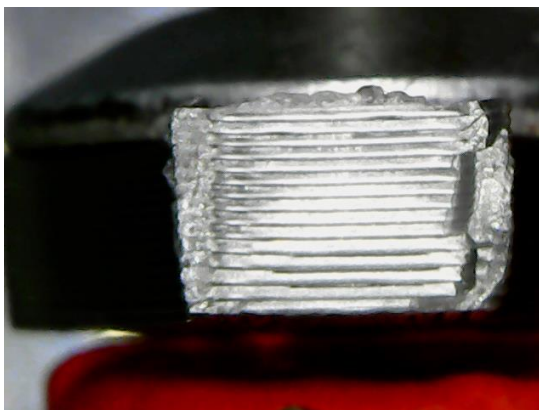
Výpočet konfidenčního intervalu, pro pevnost v tahu:

$$I = \bar{x} \pm t_{1-\frac{\alpha}{2};n-1} \cdot \frac{s}{\sqrt{n}}$$

$$I = \bar{x} \pm t_{0,975;8} \cdot \frac{s}{\sqrt{n}} = 27,2 \pm 2,306 \cdot \frac{4,04}{\sqrt{9}} = 27,2 \pm 3,1 \text{ MPa}$$



Obr. 5.9 Grafické znázornění výsledků pro KAVAN PRO.



Obr. 5.10 Vzorek číslo 15 z pohledu z mikroskopu.

UHU Plast Special

Naměřené hodnoty pro lepidlo KAVAN PRO jsou v tabulce 5.3. Obrázek 5.11 znázorňuje vypočítané hodnoty a na obrázku 5.12 je ukázán vzorek číslo 26.

Tab. 5.3 Naměřené hodnoty pro UHU Plast Special.

Číslo vzorku [-]	Maximální zatížení [N]	Pevnost v tahu [MPa]	Druh lomu	Rozměr [mm]	
				a	b
21	62.7	4.13	K	4.9	3.1
22	30.3	1.93	K	4.9	3.2
23	63.9	3.99	K	5	3.2
24	63.3	3.96	K	5	3.2
25	76.3	4.83	K	5.1	3.1
26	64.2	4.23	K	4.9	3.1
27	72.8	4.64	K	4.9	3.2
28	105.3	6.72	K	4.9	3.2
29	71.1	4.59	K	5	3.1
30	28.7	1.89	K	4.9	3.1

Vzorový výpočet plochy lepeného spoje:

$$S_t = a \cdot b$$

$$S_t = 4,9 \cdot 3,1 = 15,19 \text{ mm}^2$$

Vzorový výpočet pevnosti v tahu:

$$\tau_t = \frac{F}{S_t}$$

$$\tau_t = \frac{62,7}{15,19} = 4,13 \text{ MPa}$$

Výpočet aritmetického průměru, pro pevnost v tahu:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n x_i$$

$$\bar{x} = \frac{1}{8} \cdot \sum_{i=1}^8 x_i = \frac{4,13 + 3,99 + 3,96 + 4,83 + 4,23 + 4,64 + 6,72 + 4,59}{8} = 4,6 \text{ MPa}$$

Výpočet směrodatné odchylky, pro pevnost v tahu byl proveden v programu Microsoft Excel.

$$s = 0,9$$

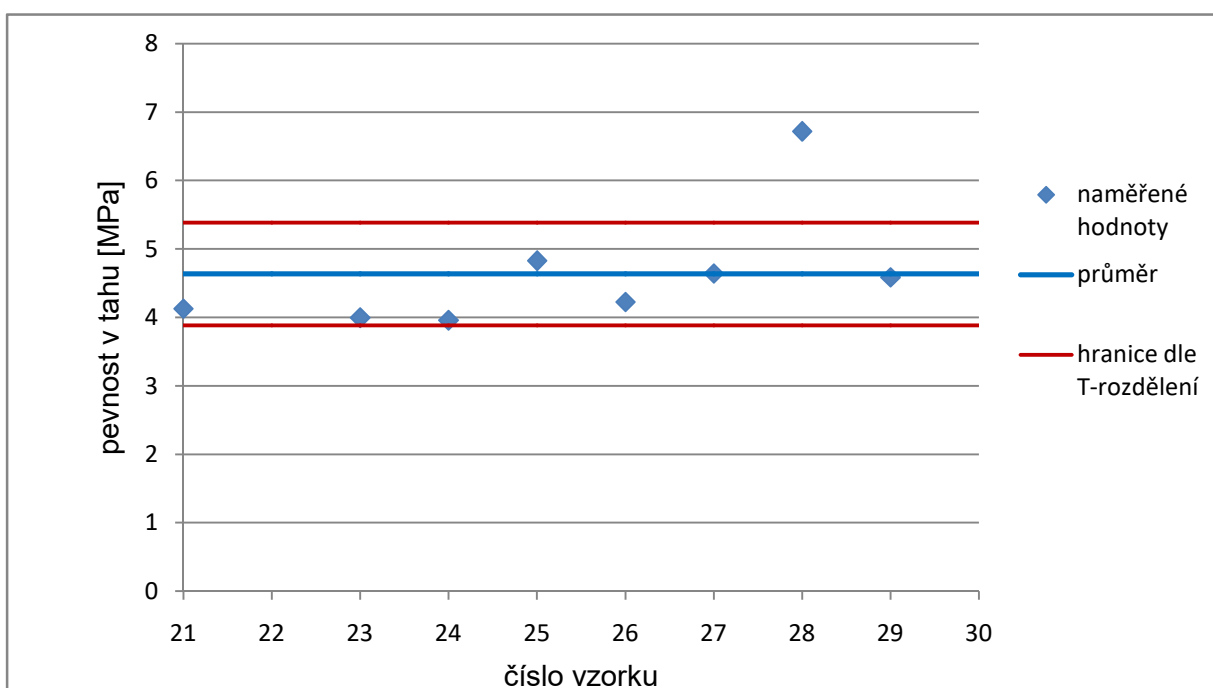
Hodnota $t_{0,975;7}$ byla vypočítána pomocí programu Microsoft Excel:

$$t_{0,975;7} = 2,364$$

Výpočet konfidenčního intervalu, pro pevnost v tahu:

$$I = \bar{x} \pm t_{1-\frac{\alpha}{2};n-1} \cdot \frac{s}{\sqrt{n}}$$

$$I = \bar{x} \pm t_{0,975;7} \cdot \frac{s}{\sqrt{n}} = 4,6 \pm 2,364 \cdot \frac{0,9}{\sqrt{8}} = 4,6 \pm 0,8 \text{ MPa}$$



Obr. 5.11 Grafické znázornění výsledků pro UHU Plast Special.



Obr. 5.12 Vzorek číslo 26.

Alteco 3-Ton Clear

Naměřené hodnoty pro lepidlo KAVAN PRO jsou v tabulce 5.4, obrázek 5.13 znázorňuje vypočítané hodnoty a na obrázku 5.14 je ukázán vzorek číslo 32 z pohledu z mikroskopu.

Tab. 5.4 Naměřené hodnoty pro Alteco 3-Ton Clear.

Číslo vzorku [-]	Maximální zatížení [N]	Pevnost v tahu [MPa]	Druh lomu	Rozměr [mm]	
				a	b
31	55.4	3.77	A	4.9	3
32	72.5	4.77	A	4.9	3.1
33	63.5	3.97	A	5	3.2
34	105.9	6.70	A	5.1	3.1
35	90.1	5.81	A	5	3.1
36	87.9	5.79	A	4.9	3.1
37	52	3.32	S	4.9	3.2
38	149.6	9.65	A	5	3.1
39	38	2.59	A	4.9	3
40	60.4	3.85	A	4.9	3.2

Vzorový výpočet plochy lepeného spoje:

$$S_t = a \cdot b$$

$$S_t = 4,9 \cdot 3 = 14,7 \text{ mm}^2$$

Vzorový výpočet pevnosti v tahu:

$$\tau_t = \frac{F}{S_t}$$

$$\tau_t = \frac{55,4}{14,7} = 3,77 \text{ MPa}$$

Výpočet aritmetického průměru, pro pevnost v tahu:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n x_i$$

$$\begin{aligned} \bar{x} &= \frac{1}{9} \cdot \sum_{i=1}^9 x_i = \frac{3,77 + 4,77 + 3,97 + 6,7 + 5,81 + 5,79 + 3,32 + 9,65 + 3,85}{9} = \\ &= 5,3 \text{ MPa} \end{aligned}$$

Výpočet směrodatné odchylky, pro pevnost v tahu byl proveden v programu Microsoft Excel.

$$s = 1,99$$

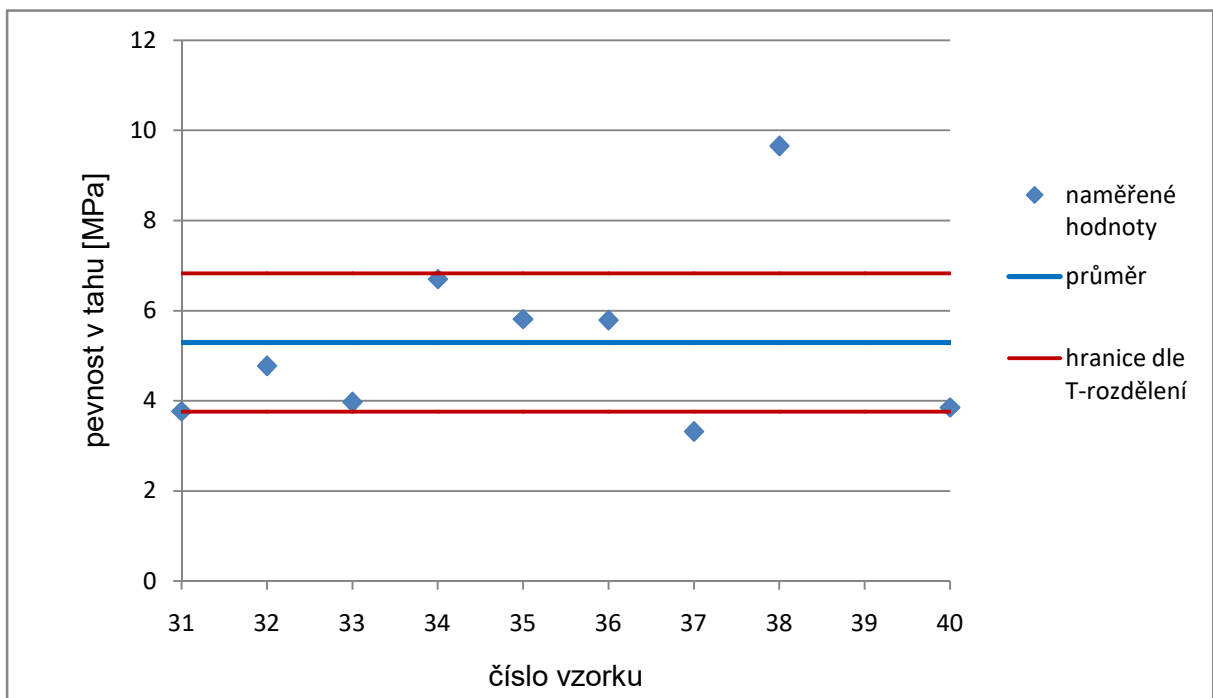
Hodnota $t_{0,975;8}$ byla vypočítána pomocí programu Microsoft Excel:

$$t_{0,975;8} = 2,306$$

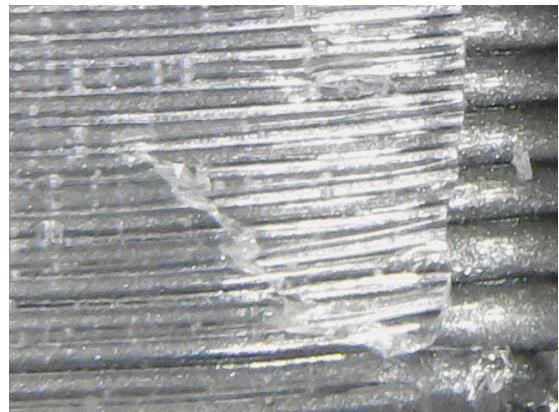
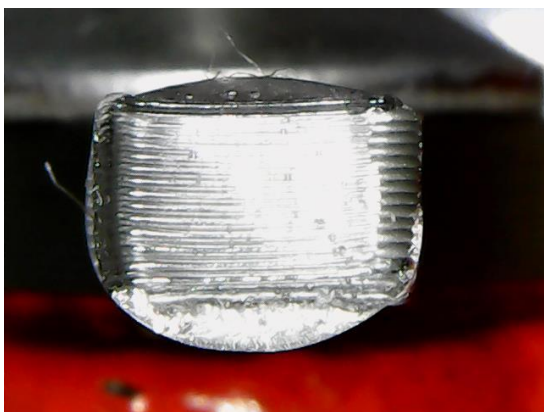
Výpočet konfidenčního intervalu, pro pevnost v tahu:

$$I = \bar{x} \pm t_{1-\frac{\alpha}{2};n-1} \cdot \frac{s}{\sqrt{n}}$$

$$I = \bar{x} \pm t_{0,975;8} \cdot \frac{s}{\sqrt{n}} = 5,3 \pm 2,306 \cdot \frac{1,99}{\sqrt{9}} = 5,3 \pm 1,5 \text{ MPa}$$



Obr. 5.13 Grafické znázornění výsledků pro Alteco 3-Ton Clear.



Obr. 5.14 Vzorek číslo 32 z pohledu z mikroskopu.

Bison Power Addhesive

Naměřené hodnoty pro lepidlo Bison Power Addhesive jsou v tabulce 5.5, obrázek 5.15 znázorňuje vypočítané hodnoty a na obrázku 5.16 je fotografie vzorku 43.

Tab. 5.5 Naměřené hodnoty pro Bison Power Addhesive.

Číslo vzorku [-]	Maximální zatížení [N]	Pevnost v tahu [MPa]	Druh lomu	Rozměr [mm]	
				a	b
41	-	-	Z	-	-
42	18.4	1.17	A	4.96	3.17
43	47.9	3.05	A	4.96	3.17
44	58.8	3.74	A	4.96	3.17
45	30.6	1.95	A	4.96	3.17
46	29.4	1.87	A	4.96	3.17
47	106.9	6.80	A	4.96	3.17
48	157	9.99	A	4.96	3.17
49	161	10.24	A	4.96	3.17
50	104.4	6.64	A	4.96	3.17

Vzorový výpočet plochy lepeného spoje:

$$S_t = a \cdot b$$

$$S_t = 4,96 \cdot 3,17 = 15,72 \text{ mm}^2$$

Vzorový výpočet pevnosti v tahu:

$$\tau_t = \frac{F}{S_t}$$

$$\tau_t = \frac{47,9}{15,72} = 3,05 \text{ MPa}$$

Výpočet aritmetického průměru, pro pevnost v tahu:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n x_i$$

$$\bar{x} = \frac{1}{8} \cdot \sum_{i=1}^8 x_i = \frac{3,05 + 3,74 + 1,95 + 1,87 + 6,8 + 9,99 + 10,24 + 6,64}{8} = 5,6 \text{ MPa}$$

Výpočet směrodatné odchylky, pro pevnost v tahu byl proveden v programu Microsoft Excel.

$$s = 3,39$$

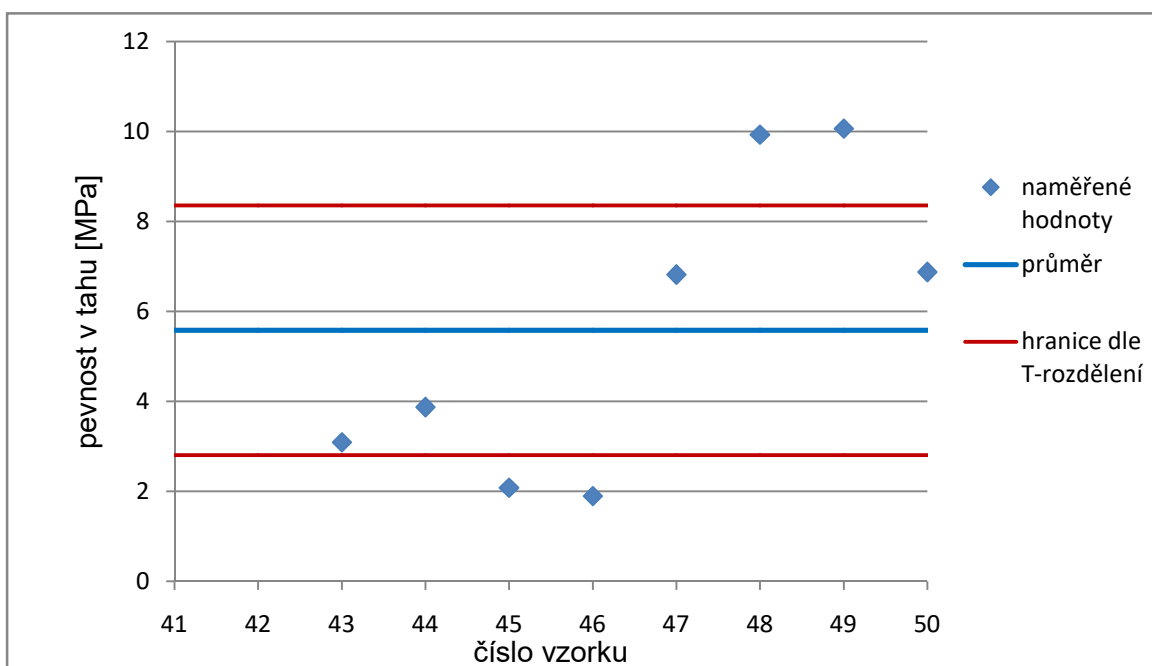
Hodnota $t_{0,975;8}$ byla vypočítána pomocí programu Microsoft Excel:

$$t_{0,975;7} = 2,364$$

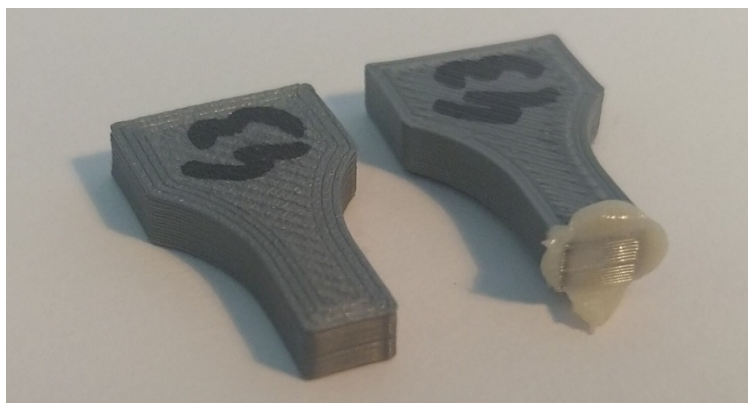
Výpočet konfidenčního intervalu, pro pevnost v tahu:

$$I = \bar{x} \pm t_{1-\frac{\alpha}{2};n-1} \cdot \frac{s}{\sqrt{n}}$$

$$I = \bar{x} \pm t_{0,975;9} \cdot \frac{s}{\sqrt{n}} = 5,6 \pm 2,364 \cdot \frac{3,39}{\sqrt{8}} = 5,6 \pm 2,8 \text{ MPa}$$



Obr. 5.15 Grafické znázornění výsledků pro Bison Power Adhesive.



Obr. 5.16 Vzorek číslo 43.

Nelepené vzorek

Naměřené hodnoty pro nelepené vzorky byly zapsány do tabulky 5.6. Na obrázku 5.17 je obrázek přetrženého vzorku 109 pořízený mikroskopem. Na obrázku 5.18 je fotografie vzorku 108.

Tab. 5.6 Naměřené hodnoty pro nelepené vzorky.

Číslo vzorku [-]	Maximální zatížení [N]	Pevnost v tahu [MPa]	Rozměr [mm]	
			a	b
101	-	-	5	3.1
102	-	-	5	3.1
103	-	-	5	3.2
104	-	-	4	3.1
105	-	-	3.9	3.1
106	-	-	4	3.1
107	479.6	51.68	2.9	3.2
108	474.9	51.17	2.9	3.2
109	473.9	52.89	2.8	3.2
110	338.1	55.52	2.9	2.1
111	354.8	55.61	2.9	2.2
112	349.6	54.80	2.9	2.2

Vzorový výpočet plochy lepeného spoje:

$$S_t = a \cdot b$$

$$S_t = 3,2 \cdot 2,9 = 9,28 \text{ mm}^2$$

Vzorový výpočet pevnosti v tahu:

$$\tau_t = \frac{F}{S_t}$$

$$\tau_t = \frac{479,6}{9,28} = 51,68 \text{ MPa}$$

Výpočet aritmetického průměru, pro pevnost v tahu:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n x_i$$

Pro vzorky 107-109

$$\bar{x} = \frac{1}{3} \cdot \sum_{i=1}^3 x_i = \frac{51,68 + 51,17 + 52,89}{3} = 51,9 \text{ MPa}$$

Výpočet směrodatné odchylky, pro pevnost v tahu byl proveden v programu Microsoft Excel.

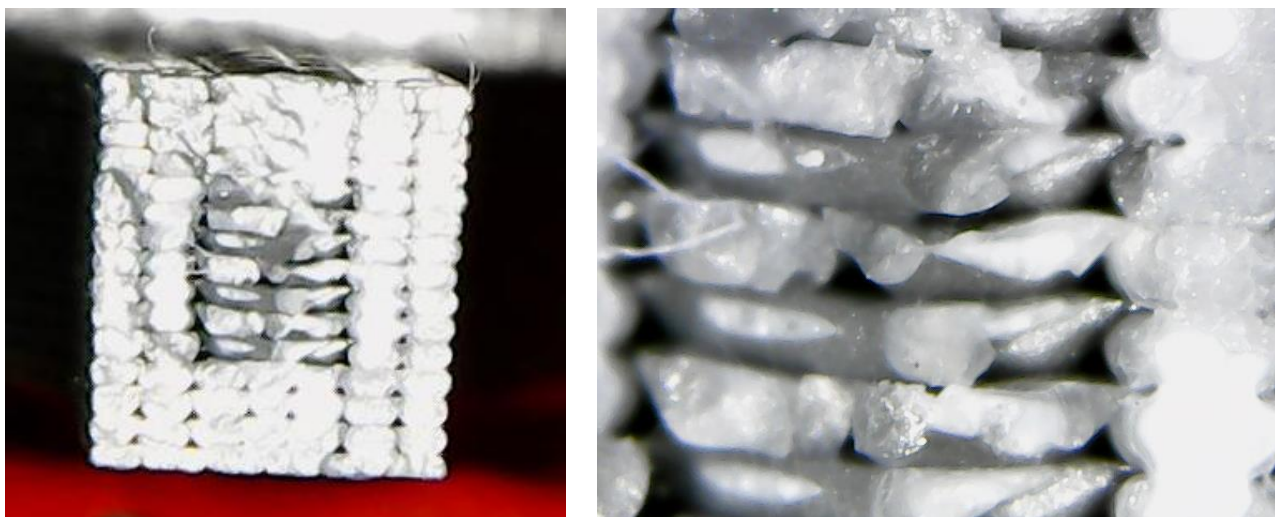
$$s = 0,88$$

Pro vzorky 110-112

$$\bar{x} = \frac{1}{3} \cdot \sum_{i=1}^3 x_i = \frac{55,52 + 55,61 + 54,8}{3} = 55,3 \text{ MPa}$$

Výpočet směrodatné odchylky, pro pevnost v tahu byl proveden v programu Microsoft Excel.

$$s = 0,44$$

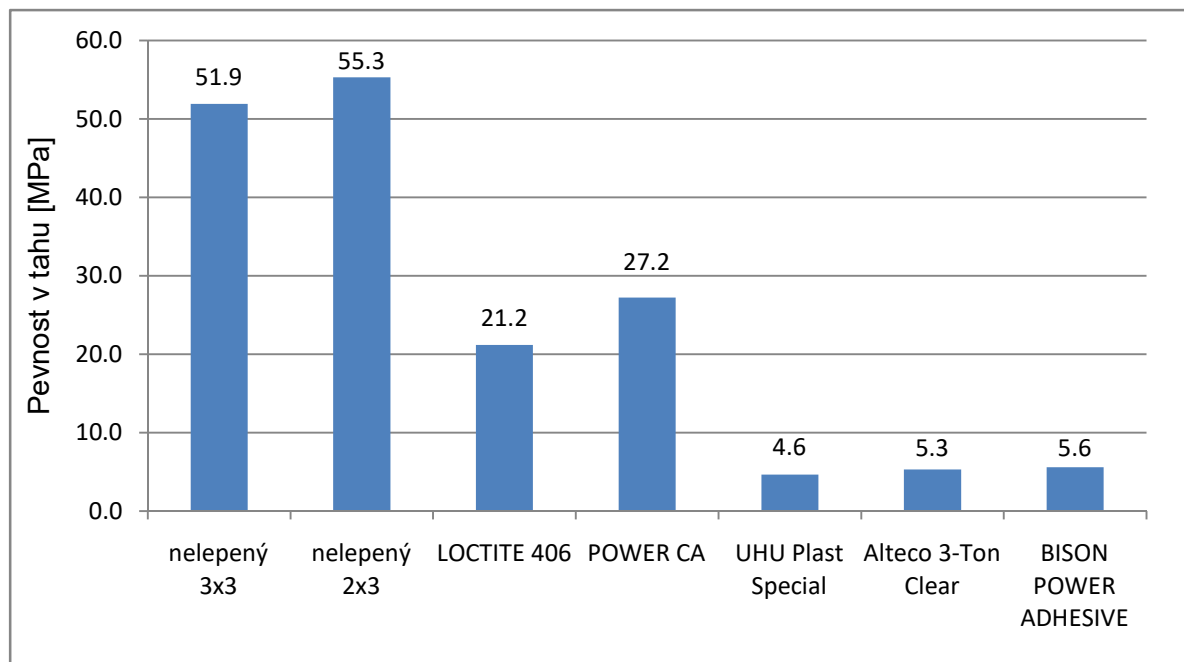


Obr. 5.17 Vzorek číslo 109 z pohledu z mikroskopu.



Obr. 5.18 Vzorek číslo 108.

Kvůli nedostatečné síle trhacího zařízení nedošlo k přetržení v případě vzorků 101-106. Proto byly použity menší vzorky. Z porovnání obou variant můžeme vidět, že menší vzorek dosahuje vyšší pevnosti. To je pravděpodobně způsobeno tím, že obvodová vrstva má vyšší pevnost v namáhaném směru než výplň vzorku. Na obrázku 5.19 je srovnání průměrné pevnosti nelepených a lepených vzorků.



Obr. 5.19 Srovnání průměrných pevností v tahu.

5.5 VYHODNOCENÍ ZKOUŠKY PEVNOSTI VE SMYKU

Stejně jako v případě pevnosti v tahu je nutné přepočítat maximální zatížení na pevnost ve smyku, za tímto účelem byl použit vzorec 5.6. K dosazení bylo potřeba nejdříve vypočítat plochu lepeného spoje ve smyku dle vzorce 5.7.

$$\tau_s = \frac{F}{S_s} [MPa] \quad 5.6$$

kde: τ_s – pevnost ve smyku [MPa]

F – působící síla [N]

S_s – plocha lepeného spoje pro smyk [mm²]

$$S_s = b \cdot c [mm^2] \quad 5.7$$

kde: S_t – plocha lepeného spoje pro smyk [mm²]

b – šířka vzorku [mm]

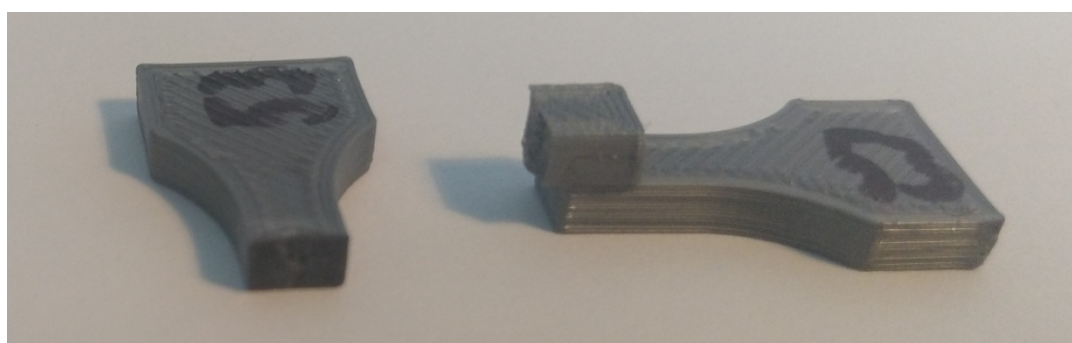
c – délka přeplátování [mm]

LOCTITE 406

Téměř ve všech případech došlo k porušení materiálu dříve než lepeného spoje, tyto hodnoty nejsou vhodné k dalšímu porovnání. Pouze naznačují, že pevnost lepeného spoje je vyšší než naměřené hodnoty. Tabulka 5.7 obsahuje naměřené a vypočítané hodnoty. Na obrázku 5.20 je fotografie vzorku 53.

Tab. 5.7 Naměřené hodnoty pro LOCTITE 406

Číslo vzorku [-]	Maximální zatížení [N]	Pevnost ve smyku [MPa]	Druh lomu	Provedení	Rozměr [mm]	
					b	c
51	222.8	10.61	K	A	5	4.2
52	471.7	22.39	M	A	4.9	4.3
53	314.9	15.30	M	A	4.9	4.2
54	342.1	15.60	M	A	5.1	4.3
55	379.6	18.52	M	A	5	4.1
56	364.7	17.72	M	B	4.9	4.2
57	381.3	18.98	M	B	4.9	4.1
58	321.2	15.30	M	B	5	4.2
59	412.4	20.04	M	B	4.9	4.2
60	363.3	18.08	M	B	4.9	4.1



Obr. 5.20 Vzorek číslo 53.

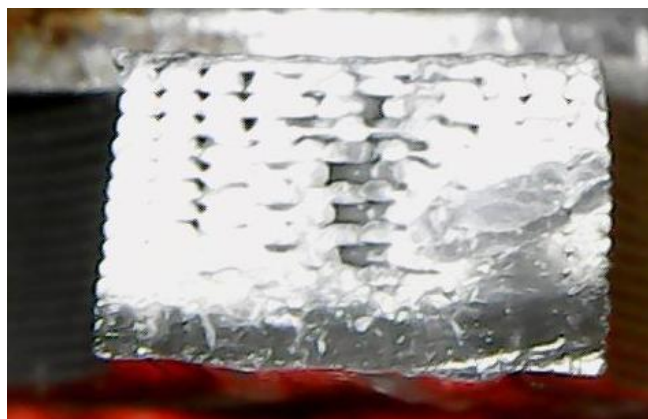
KAVAN PRO

Naměřené hodnoty byly zapsány do tabulky 5.8. Obrázek 5.21 ukazuje, že u vzorku 66 došlo ve spodní části k stlačení výplně. U variant A a B došlo ve všech případech k porušení materiálu. V případě varianty C došlo k vytvoření

bílého povlaku, který měl negativní vliv na lepený spoj, tyto hodnoty nejsou vhodné k dalším výpočtům.

Tab. 5.8 Naměřené hodnoty pro KAVAN PRO.

Číslo vzorku [-]	Maximální zatížení [N]	Pevnost ve smyku [MPa]	Druh lomu	Provedení	Rozměr [mm]	
					b	c
61	376	17.49	M	A	5	4.3
62	405	19.68	M	A	4.9	4.2
63	438.4	20.88	M	A	5	4.2
64	365.3	17.82	M	A	5	4.1
65	395.9	18.48	M	A	5.1	4.2
66	391.6	19.10	M	B	5	4.1
67	312.4	15.18	M	B	4.9	4.2
68	403	19.66	M	B	5	4.1
69	368.9	17.93	M	B	4.9	4.2
70	382.6	18.59	M	B	4.9	4.2
113	232.6	11.30	A	C	4.9	4.2
114	210.8	10.00	A	C	4.9	4.3
115	214.5	10.21	M	C	5	4.2
116	145.4	6.90	K	C	4.9	4.3
117	227.2	11.31	A	C	4.9	4.1



Obr. 5.21 Vzorek číslo 66 z pohledu z mikroskopu.

UHU Plast Special

Tabulka 5.9 obsahuje naměřené hodnoty pro lepidlo UHU plast special, vypočítané hodnoty pro jednotlivé varianty jsou v tabulce 5.10. Na obrázcích 5.22, 5.23 a 5.24 jsou graficky znázorněny vypočítané hodnoty pro jednotlivé varianty. Na obrázku 5.25 je vzorek 76 z pohledu z mikroskopu.

Tab. 5.9 Naměřené hodnoty pro UHU Plast Special.

Číslo vzorku [-]	Maximální zatížení [N]	Pevnost ve smyku [MPa]	Druh lomu	Provedení	Rozměr [mm]	
					b	c
71	84.5	4.01	K	A	4.9	4.3
72	104.4	4.97	K	A	5	4.2
73	114.9	5.36	K	A	5.1	4.2
74	127.7	6.23	K	A	5	4.1
75	127.8	6.07	K	A	4.9	4.3
76	132.2	6.58	K	B	4.9	4.1
77	143.3	6.82	K	B	5	4.2
78	161.9	7.68	K	B	4.9	4.3
79	145.7	7.08	K	B	4.9	4.2
80	137	6.85	K	B	5	4
118	121.2	5.89	K	C	4.9	4.2
119	131.6	6.55	K	C	4.9	4.1
120	131.2	6.10	K	C	5	4.3
121	140	6.64	K	C	4.9	4.3
122	90.8	4.24	K	C	5.1	4.2

Vzorový výpočet aritmetického průměru, pro variantu A:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n x_i$$

$$\bar{x} = \frac{1}{5} \cdot \sum_{i=1}^5 x_i = \frac{4,01 + 4,97 + 5,36 + 6,23 + 6,07}{5} = 5,3 \text{ mm}$$

Výpočet směrodatné odchylky, pro variantu A byl proveden v programu Microsoft Excel.

$$s = 0,9$$

Hodnota $t_{0,975;4}$ byla vypočítána pomocí programu Microsoft Excel:

$$t_{0,975;4} = 2,776$$

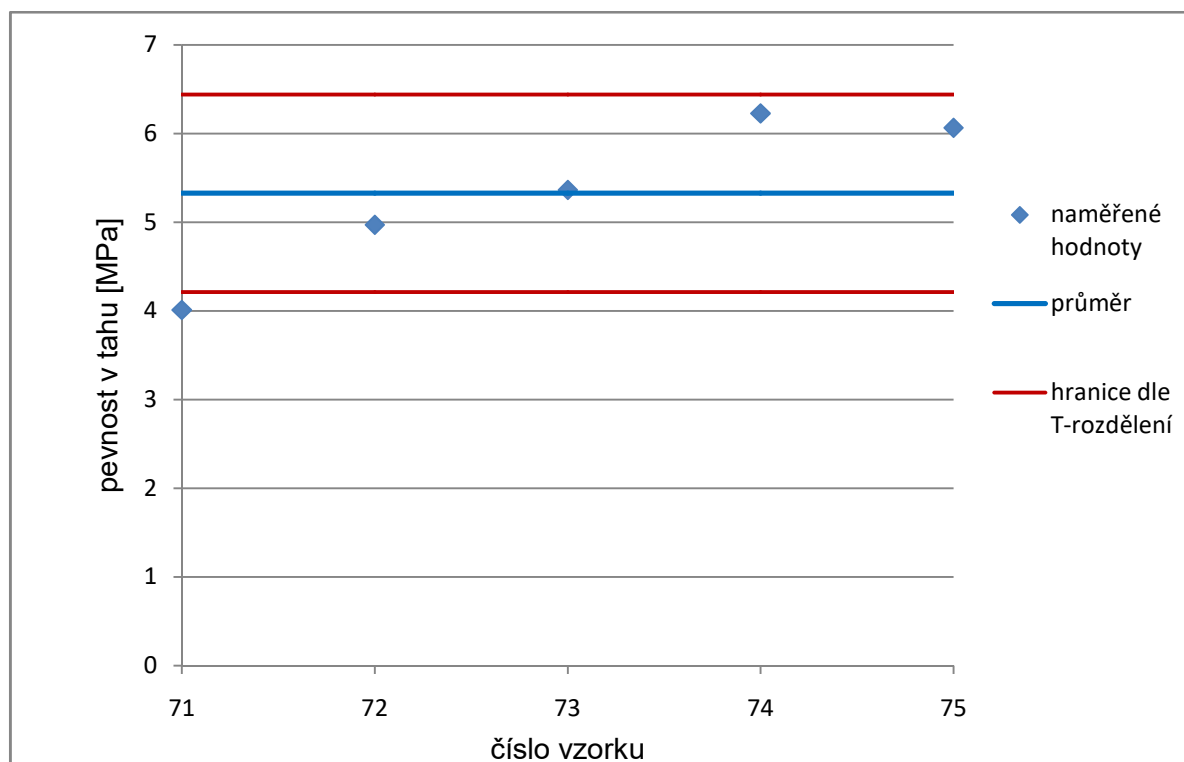
Vzorový výpočet konfidenčního intervalu, pro variantu A:

$$I = \bar{x} \pm t_{1-\frac{\alpha}{2};n-1} \cdot \frac{s}{\sqrt{n}}$$

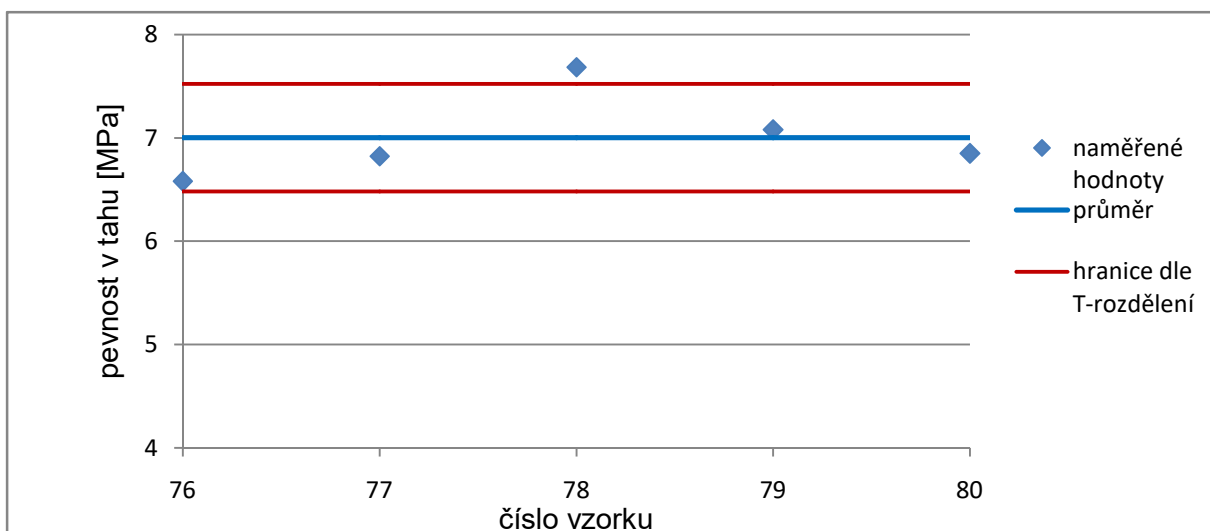
$$I = \bar{x} \pm t_{0,975;4} \cdot \frac{s}{\sqrt{n}} = 5,3 \pm 2,776 \cdot \frac{0,9}{\sqrt{5}} = 5,3 \pm 1,1 \text{ MPa}$$

Tab. 5.10 Vypočítané hodnoty pro UHU Plast Special.

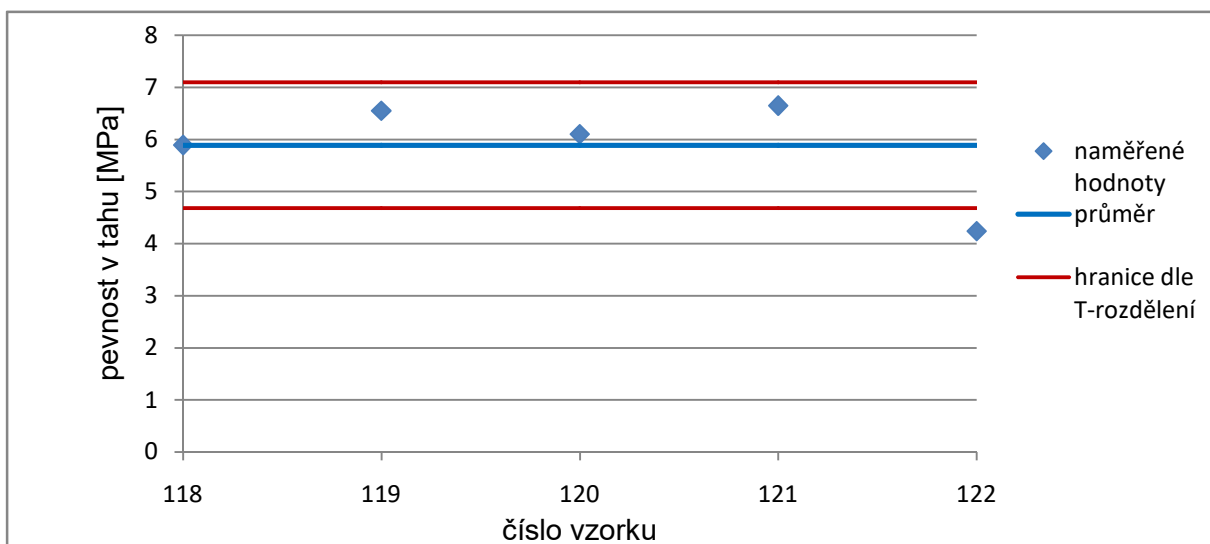
Provedení	Průměrná pevnost ve smyku [MPa]	Směrodatná odchylka	Kvantil studentova rozdělení [MPa]
A	5.3	0,9	5,3 ±1,1
B	7	0,42	7 ±0,5
C	5.9	0.97	5,9 ±1,2



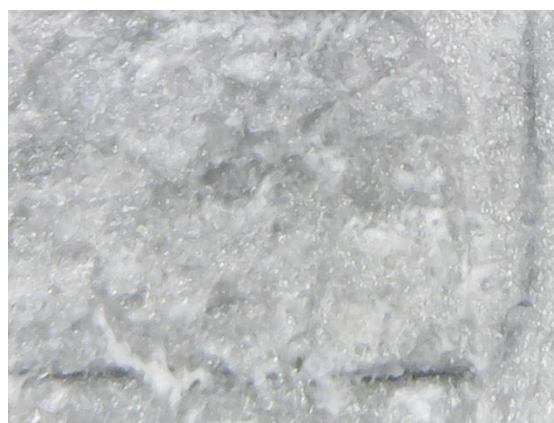
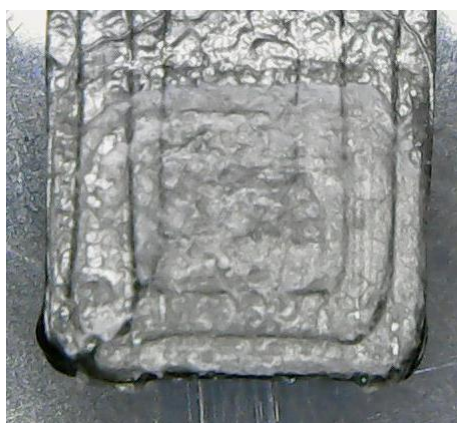
Obr. 5.22 Grafické znázornění výsledků pro UHU Plast Special varianta A.



Obr. 5.23 Grafické znázornění výsledků pro UHU Plast Special varianta B.



Obr. 5.24 Grafické znázornění výsledků pro UHU Plast Special varianta C.



Obr. 5.25 Vzorek číslo 76 z pohledu z mikroskopu.

Alteco 3-Ton Clear

Tabulka 5.11 obsahuje naměřené hodnoty, vypočítané hodnoty pro jednotlivé varianty jsou v tabulce 5.12. Na obrázku 5.26 je vzorek 86 a na obrázku 5.27 je vzorek 126. Obrázky 5.28 a 5.29 zobrazují grafické výsledky.

Tab. 5.11 Naměřené hodnoty pro Alteco 3-Ton Clear.

Číslo vzorku [-]	Maximální zatížení [N]	Pevnost ve smyku [MPa]	Druh lomu	Provedení	Rozměr [mm]	
					b	c
81	86.3	4.30	A	A	4.9	4.1
82	38.7	1.80	A	A	5	4.3
83	23.5	1.12	A	A	5	4.2
84	16.4	0.78	A	A	4.9	4.3
85	73.9	3.52	A	A	5	4.2
86	122.2	5.94	S	B	4.9	4.2
87	98.4	5.02	A	B	4.9	4
88	136.2	6.51	A	B	5.1	4.1
89	44.2	2.15	A	B	4.9	4.2
90	60.4	2.95	A	B	5	4.1
123	99.1	4.93	A	C	4.9	4.1
124	-	-	Z	C	4.9	4.2
125	153	7.12	A	C	5	4.3
126	141.5	6.88	A	C	4.9	4.2
127	163.6	7.79	A	C	5	4.2

Vzorový výpočet aritmetického průměru, pro variantu A:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n x_i$$

$$\bar{x} = \frac{1}{5} \cdot \sum_{i=1}^5 x_i = \frac{4,3 + 1,8 + 1,12 + 0,78 + 3,52}{5} = 2,3 \text{ MPa}$$

Výpočet směrodatné odchylky, pro variantu A byl proveden v programu Microsoft Excel.

$$s = 1,54$$

Hodnota $t_{0,975;4}$ byla vypočítána pomocí programu Microsoft Excel:

$$t_{0,975;4} = 2,776$$

Vzorový výpočet konfidenčního intervalu, pro variantu A:

$$I = \bar{x} \pm t_{1-\frac{\alpha}{2};n-1} \cdot \frac{s}{\sqrt{n}}$$

$$I = \bar{x} \pm t_{0,975;4} \cdot \frac{s}{\sqrt{n}} = 2,3 \pm 2,776 \cdot \frac{1,54}{\sqrt{5}} = 2,3 \pm 1,9 \text{ MPa}$$

Tab. 5.12 Vypočítané hodnoty pro Alteco 3-Ton Clear.

Provedení	Průměrná pevnost ve smyku [MPa]	Směrodatná odchylka	Kvantil studentova rozdělení [MPa]
A	2,3	1,54	$2,3 \pm 1,9$
B	4,5	1,89	$4,4 \pm 2,3$
C	6,7	1,23	-

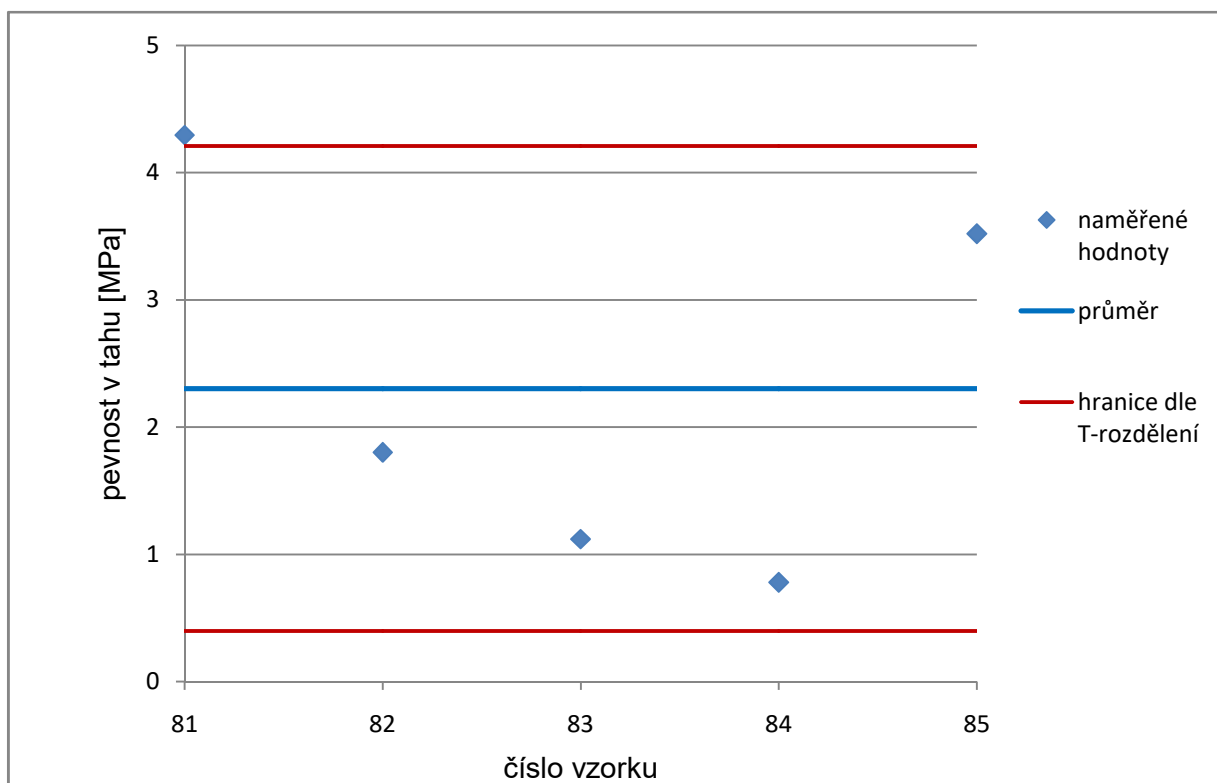
Varianta A vykazuje nízkou pevnost a velkou směrodatnou odchylku, mohlo dojít k náhodnému výskytu většího množství nekvalitních vzorků. U varianty C nebylo naměřeno dostatek hodnot pro širší statistické vyhodnocení.



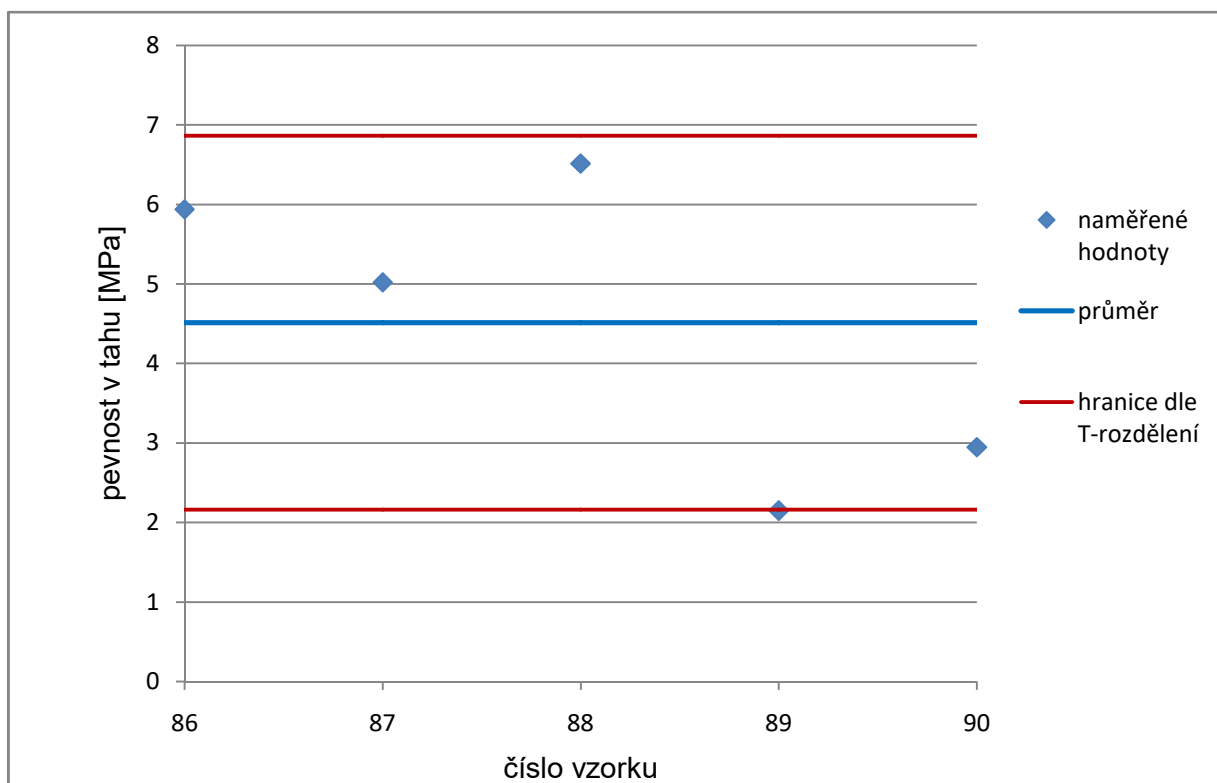
Obr. 5.26 Vzorek číslo 86.



Obr. 5.27 Vzorek číslo 126.



Obr. 5.28 Grafické znázornění výsledků pro Altec 3-Ton Clear varianta A.



Obr. 5.29 Grafické znázornění výsledků pro Altec 3-Ton Clear varianta B.

Bison Power Addhesive

Tabulka 5.13 obsahuje naměřené hodnoty, vypočítané hodnoty pro jednotlivé varianty jsou v tabulce 5.14. Na obrázku 5.30 jsou znázorněny grafické výsledky a na obrázku 5.31 je vzorek 96.

Tab. 5.13 Naměřené hodnoty pro Bison Power Addhesive.

Číslo vzorku [-]	Maximální zatížení [N]	Pevnost ve smyku [MPa]	Druh lomu	Provedení	Rozměr [mm]	
					b	c
91	72	3.42	A	A	4.9	4.3
92	77	3.74	A	A	4.9	4.2
93	107.6	5.36	A	A	4.9	4.1
94	100.5	4.69	A	A	5.1	4.2
95	99.1	4.93	A	A	4.9	4.1
96	158.3	7.54	A	B	5	4.2
97	82	3.98	A	B	4.9	4.2
98	-	-	Z	B	5	4.1
99	-	-	Z	B	5	4.1
100	35.3	1.72	A	B	4.9	4.2

Vzorový výpočet plochy lepeného spoje:

$$S_t = b \cdot c$$

$$S_t = 4,9 \cdot 4,3 = 21,07 \text{ mm}^2$$

Vzorový výpočet pevnosti ve smyku:

$$\tau_t = \frac{F}{S_t} = \frac{72}{21,07} = 3,42 \text{ MPa}$$

Výpočet aritmetického průměru, pro pevnost ve smyku ve variantě A:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n x_i$$

$$\bar{x} = \frac{1}{5} \cdot \sum_{i=1}^5 x_i = \frac{3,42 + 3,74 + 5,36 + 4,69 + 4,93}{5} = 4,4 \text{ MPa}$$

Výpočet směrodatné odchylky, pro smyk ve variantě A byl proveden v programu Microsoft Excel.

$$s = 0,82$$

Hodnota $t_{0,975;4}$ byla vypočítána pomocí programu Microsoft Excel:

$$t_{0,975;4} = 2,776$$

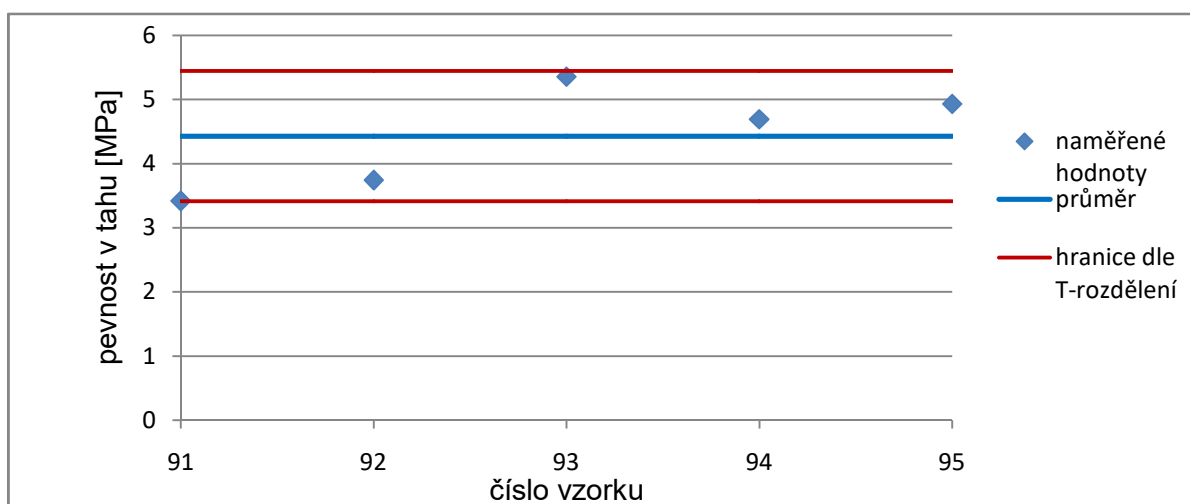
Výpočet konfidenčního intervalu, pro pevnost ve smyku ve variantě A:

$$I = \bar{x} \pm t_{1-\frac{\alpha}{2};n-1} \cdot \frac{s}{\sqrt{n}}$$

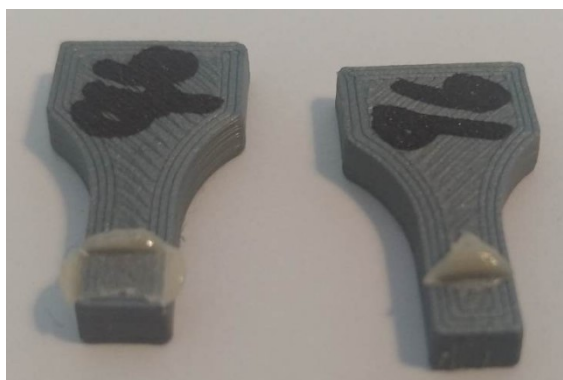
$$I = \bar{x} \pm t_{0,975;4} \cdot \frac{s}{\sqrt{n}} = 4,4 \pm 2,776 \cdot \frac{0,82}{\sqrt{5}} = 4,4 \pm 1 \text{ MPa}$$

Tab. 5.14 Vypočítané hodnoty pro Bison Power Addhesive.

Provedení	Průměrná pevnost ve smyku [MPa]	Směrodatná odchylka	Kvantil studentova rozdělení [MPa]
A	4,4	0,76	4,4 ± 1
B	4,4	2,93	-



Obr. 5.30 Grafické znázornění výsledků pro Bison Power Addhesive varianta A.



Obr. 5.31 Vzorek číslo 96.

6 TECHNICKO-EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ

Výsledky z předchozí kapitoly byly zaznamenány do tabulky 6.1 pro tah a 6.2 pro smyk, aby bylo možné je jednoduše porovnat. Z hodnot zapsaných do tabulky byly vyloučeny nevhodné vzorky, stejně jako v předchozí kapitole. Z výsledků je jasné patrné, že největší pevnosti dosahují kyanoakrylátová lepidla. Toto naznačuje, že zvolené metody zkoušek byly vhodné k porovnání lepidel za účelem volby nejvhodnějšího z nich. Problém nastává u porovnání směrodatných odchylek a kvantilu studentova rozdělení, kde lze pozorovat velký rozptyl naměřených hodnot. Toto je pravděpodobně způsobeno zaměřením zkoušky na jednoduché a rychlé porovnání většího množství vzorků. Hlavním faktorem je volba trhacího zařízení, které umožňuje maximální zatížení 500 N a velikost vzorků, tedy fakt, že i drobné rozdíly kvality tisku nebo lepení mají významný vliv na výslednou pevnost a dají se hůře zjistit. Dalším faktorem může být například deformace vzorku během chladnutí nebo špatné odmaštění vzorku.

K porovnání pevnosti zvolených lepidel je vhodnější zkouška pevnosti v tahu, byla zvolena jako hlavní kritérium a proto pro ni bylo vytvořeno více vzorků. Také je možné výsledky porovnat s pevností nelepených vzorků. Trhací zařízení nedokázalo přethnout nelepené vzorky o stejné tloušťce a šířce jako lepené, proto bylo nutné zmenšit tyto rozměry. Práce se nezabývá porovnáváním různých parametrů tisku, proto zvolené parametry nemusí být vhodným reprezentantem 3D tištěných dílů.

Zkouška pevnosti ve smyku byla provedena v několika variantách povrchu, a proto každá varianta byla navržena na menší počet vzorků, v některých případech nebylo naměřeno dostatek vhodných hodnot, k výpočtu směrodatné odchylky. U kyanoakrylátových lepidel se ukázalo, že jejich pevnost je vyšší než pevnost tištěného dílu, z toho důvodu je nelze použít k dalším výpočtům. Pouze ukazují, že pevnost těchto lepidel je vyšší než naměřená hodnota. Oproti předpokladu byla u epoxidových lepidel pevnost ve smyku nižší než pevnost v tahu.

Protože se jedná o velice malé vzorky, bylo by velice složité a nepřesné zjišťovat množství lepidla použitého na jednotlivé spoje. Proto bude brána v úvahu cena lepidla přepočítaná na jeden gram.

Z naměřených hodnot vyplývá, že nejvyšší pevnosti dosahují kyanoakrylátová lepidla LOCTITE 406 a KAVAN PRO. U obou lepidel se jejich pevnost ukázala jako vyšší než pevnost vzorků při namáhání smykem, proto je možné je porovnat pouze v tahu. Z tohoto porovnání vychází lépe lepidlo KAVAN PRO, i přesto že je druhé nejlevnější ze zvolených lepidel. Cena byla 75 Kč za 20g, to odpovídá 3,8 Kč/g. Naopak LOCTITE 406 je nejdražší lepidlo z vybraných s cenou 295 Kč za 20 g, to odpovídá 14,8 Kč/g. V případě lepidla KAVAN PRO byla také provedena doplňková smyková zkouška ve variantě C, bohužel došlo k vytvoření bílého povlaku který zkoušku znehodnocuje.

Dvousložková lepidla Alteco 3-Ton Clear a Bison Power Addhesive měla velice podobné výsledky, v obou případech docházelo nejčastěji k adheznímu lomu. V případě pevnosti v tahu dosáhly vyšší pevnosti než UHU Plast Special, v případě namáhání na smyk ve variantě A a B byl výsledek opačný. Při hodnocení těchto lepidel je tedy důležitým faktorem provedení povrchu. Cena UHU Plast Special byla 125 Kč za 30g, tedy 4,2 Kč/g. Cena lepidla Alteco 3-Ton Clear byla 123 Kč za 20 g, to odpovídá 6,2 Kč/g. Cena Bison Power Addhesive byla 250 Kč za 65 ml, vzhledem k hustotě z technického listu, to odpovídá 2,7 Kč/g.

Tab. 6.1 Výsledné hodnoty z tahové zkoušky.

Lepidlo	Průměrná pevnost v tahu [MPa]	Směrodatná odchylka	Kvantil studentova rozdělení [MPa]
LOCTITE 406	21,2	3,6	21,2 ±3
KAVAN PRO	27,2	4,04	27,2 ±3,1
UHU Plast Special	4,6	0,9	4,6 ±0,8
Alteco 3-Ton Clear	5,3	1,99	5,3 ±1,5
Bison Power Addhesive	5,6	3,32	5,6 ±2,8
Nelepený vzorek 3x3	51,9	-	-
Nelepený vzorek 2x3	55,3	-	-

Tab. 6.2 Výsledné hodnoty pro smykovou zkoušku.

Lepidlo	Provedení	Průměrná pevnost ve smyku [MPa]	Směrodatná odchylka	Kvantil studentova rozdělení [MPa]
LOCTITE 406	A	-	-	-
	B	-	-	-
KAVAN PRO	A	-	-	-
	B	-	-	-
	C	-	-	-
UHU Plast Special	A	5,3	0,9	5,3 ±1,1
	B	7	0,42	7 ±0,5
	C	5,9	0,97	5,9 ±1,2
Alteco 3-Ton Clear	A	2,3	1,54	2,3 ±1,9
	B	4,5	1,89	4,4 ±2,3
	C	6,7	1,23	-
Bison Power Addhesive	A	4,4	0,76	4,4 ±1
	B	4,4	2,93	-

ZÁVĚR

Práce se zabývala volbou vhodných lepidel k lepení dílů tištěných z PLA. Z toho důvodu byl navržen experiment k otestování pevnosti v tahu a ve smyku tištěných vzorků. Experiment byl navržen, aby posuzoval vliv plochy vytištěné na 3D tiskárně, proto nebyly broušeny nebo jinak upravovány, došlo pouze k očištění povrchu. Práce se nezabývá různými variantami 3D tisku, je proto možné, že volbou vhodnějších parametrů tisku lze dosáhnout lepších výsledků. Zkouška posuzovala vzorky o menších rozměrech, vhodné k rychlému posouzení většího množství kusů. Testování vzorků bylo provedeno na experimentálním trhacím zařízení. Před lepením byly vzorky očištěny a odmaštěny za použití přípravku LOCTITE SF 7070.

Tahová zkouška byla zvolena jako hlavní kritérium k porovnání pevnosti, protože umožňuje namáhání dílu směrem, ve kterém mají vyšší pevnost. Také bylo možné provést tahovou zkoušku na nelepených vzorcích, kde se ukázalo, že vzorky z jednoho kusu dosahují pevnosti přibližně 55 MPa. Zkouška pevnosti ve smyku se zabývala dalšími variantami povrchu a jejich vlivem na pevnost spoje. Naměřené výsledky byly statisticky zpracované, pokud to bylo možné.

K porovnání bylo zvoleno 5 různých lepidel. Mezi vybranými lepidly byly 2 zástupci kyanoakrylátových lepidel (LOCTITE 406 a KAVAN PRO) s použitím aktivátoru (LOCTITE SF 7455 a KAVAN PRO CA), dále lepidlo na bázi rozpouštědel (UHU Plast Special) a 2 zástupci epoxidových lepidel (Alteco 3-Ton Clear a Bison Power Addhesive).

Z naměřených hodnot se ukázalo, že vyšší pevnosti dosahují vteřinová lepidla a nejvyšší pevnosti dosáhlo lepidlo KAVAN PRO, s průměrnou pevností v tahu 27,2 MPa. U pevnosti ve smyku došlo téměř ve všech případech k porušení vzorku dříve než lepidla a nebylo tedy možné změřit výslednou pevnost. KAVAN PRO bylo také druhé nejlevnější ze zvolených lepidel a jako vteřinové lepidlo umožňuje velice rychlé dosažení manipulační pevnosti.

U vteřinových lepidel docházelo k porušení vzorku dříve než lepidla, při tahové zkoušce docházelo k oddělení přední části vytištěné obvodové vrstvy. V případě smykového namáhání docházelo k deformaci vzorku a ke stlačení protilehlé vrstvy a vzorek snesl menší zatížení.

Obě epoxidová lepidla dosáhla podobných výsledků. Pevnosti v tahu přibližně 5,5 MPa ale oproti předpokladu byla pevnost ve smyku nižší, u obou lepidel docházelo nejčastěji k adheznímu lomu. V případě lepidla na bázi rozpouštědel UHU Plast Special, byla naměřena průměrná pevnost v tahu 4,6 MPa. U pevnosti ve smyku došlo k výraznému zvýšení pevnosti.

Z výsledků lze usuzovat, že provedení lepené plochy má výrazný vliv na konečnou pevnost lepeného spoje. Práce se zabývá základním srovnáním těchto ploch a nemusí být reprezentativní pro jiné provedení. Pokud jsou tedy kladeny podmínky na pevnost lepených dílů, které byly vytištěny na FDM tiskárně, je vhodné provést zkoušku srovnatelnější s pracovními podmínkami. Také je vhodné zvážit i další způsoby konstrukce lepeného spoje.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

1. BRIŠ, Petr, Jiří KUBĚNA a Jan ŠTRKAŇ. *Lepení v praxi*. Praha: Grada Publishing, 2017. ISBN 978-80-271-9260-1.
2. Hodnocení adheze a dlouhodobé stability lepidel. *Technopark Kralupy: lepidla* [online]. Praha [cit. 2021-5-17]. Dostupné z: <https://www.technopark-kralupy.cz/lepidla>
3. GREGOR, Miroslav. Technologie a technika lepení - základní informace. *Lepidla* [online]. [cit. 2021-5-17]. Dostupné z: <https://www.lepidla.cz/cs/a/technologie-a-technika-lepeni--zakladni-informace.html>
4. KOVÁČIK, Miroslav. HISTORIE 3D TISKU. *3dfactory* [online]. [cit. 2021-5-17]. Dostupné z: <https://3dfactory.cz/2017/10/27/historie/>
5. PÍŠKA, Miroslav et al. Speciální technologie obrábění. 1. vyd. Brno: CERM, 2009, 246 s. ISBN 978-80-214-4025-8
6. CHUA, Chee Kai, Kah Fai LEONG a Chu-Sing LIM. *Rapid Prototyping: Principles and Applications*. 3. vyd. Singapore: World Scientific Publishing Co., 2010, 512 s. ISBN 978-981-277-897-0
7. Rapid prototyping. *Engineering Product Design* [online]. [cit. 2021-5-16]. Dostupné z: <https://engineeringproductdesign.com/knowledge-base/rapid-prototyping-techniques/>
8. HOMOLA, JAN. Stereolitografie. *3d-tisk* [online]. 26. 2. 2013 [cit. 2021-5-16]. Dostupné z: <https://www.3d-tisk.cz/stereolitografie/>
9. Guide to Stereolithography (SLA) 3D Printing. *Formlabs* [online]. [cit. 2021-5-16]. Dostupné z: <https://formlabs.com/eu/blog/ultimate-guide-to-stereolithography-sla-3d-printing/>
10. Typy 3D tiskáren. *Maker slab* [online]. [cit. 2021-5-16]. Dostupné z: <https://makerslab.cz/typy-3d-tiskaren/>
11. CR 10 3D Printer. *CREALITY* [online]. [cit. 2021-5-17]. Dostupné z: <https://www.creality3dofficial.com/products/creality-cr-10-3d-printer>
12. MARTEL, Alexandre. The 4 Types of FFF / FDM 3D Printer Explained. *3Dnatives* [online]. 15.12.2017 [cit. 2021-5-17]. Dostupné z: <https://www.3dnatives.com/en/four-types-fdm-3d-printers140620174/#!>
13. STŘÍTESKÝ, Ondřej, Josef PRŮŠA a Martin BACH. *Základy 3D tisku: S Josefem Průšou* [online]. Praha: Prusa research, 2019 [cit. 2021-5-17]. Dostupné z: <https://www.prusa3d.cz/wp-content/uploads/zaklady-3d-tisku.pdf>
14. *Design Guidelines* [online]. [cit. 2021-5-17]. Dostupné z: <https://www.hubs.com/knowledge-base/design-guidelines/>
15. BĚHÁLEK, Luboš. *Polymery* [online]. 2015 [cit. 2021-5-16]. Dostupné z: <https://etul.publi.cz/book/180-polymery>
16. *Polymer properties* [online]. [cit. 2021-5-16]. Dostupné z: <https://omnexus.specialchem.com/polymer-properties>

-
17. *Materiálový slovník* [online]. [cit. 2021-5-16]. Dostupné z: <https://www.materialpro3d.cz/materialovy-slovník/>
 18. Přehled dostupných materiálů. *Na3d* [online]. [cit. 2021-5-16]. Dostupné z: <https://www.na3d.cz/blog/prehled-dostupnych-materialu>
 19. Filament Properties Table. *Simplify3d* [online]. [cit. 2021-5-16]. Dostupné z: <https://www.simplify3d.com/support/materials-guide/properties-table/>
 20. Materiály. *Prusa3d* [online]. [cit. 2021-5-16]. Dostupné z: <https://help.prusa3d.com/cs/materials>
 21. MRŇA, Libor. Lepení materiálů. *Vysoké učení technické v Brně: Fakulta strojního inženýrství: Ústav strojírenské technologie* [online]. [cit. 2021-5-17]. Dostupné z: http://ust.fme.vutbr.cz/svarovani/img/opory/hsv_specialni_metody_svarovani_lepeni_materialu_mrna.pdf
 22. LENFELD, Petr. DOPLŇKOVÉ TECHNOLOGIE PRO ZPRACOVÁNÍ PLASTŮ. *Technická univerzita Liberec: Fakulta strojní* [online]. [cit. 2021-5-17]. Dostupné z: http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta_tkp/sekce_plasty/12.htm
 23. AUSPERGER, Aleš. *Technologie zpracování plastu* [online]. 2015 [cit. 2021-5-17]. Dostupné z: <https://publi.cz/epubli/book/183-technologie-zpracovani-plastu>
 24. BRIŠ, Petr, Jiří KUBĚNA a Jan ŠTRKAŇ. *Lepení v praxi*. Praha: Grada Publishing, 2017. ISBN 978-80-271-9260-1.
 25. Hodnocení adheze a dlouhodobé stability lepidel. *Technopark Kralupy: lepidla* [online]. Praha [cit. 2021-5-17]. Dostupné z: <https://www.technopark-kralupy.cz/lepidla>
 26. BENEŠ, Libor. Základy teorie lepení. *České vysoké učení technické v Praze* [online]. [cit. 2021-5-17]. Dostupné z: http://users.fs.cvut.cz/libor.benes/vyuka/lepeni/Teorie_lepeni%20_%20LEAR.pdf
 27. LEPIDLA POUŽÍVANÁ V MUZEJNÍ PRAXI A PRO KONZERVOVÁNÍ A RESTAUROVÁNÍ. *Masarykova univerzita* [online]. [cit. 2021-5-17]. Dostupné z: https://is.muni.cz/el/sci/podzim2010/C3800/um/lepidla_predn_2_.pdf
 28. Reaktivní lepidla. *ADVA* [online]. [cit. 2021-5-17]. Dostupné z: <https://www.advasro.cz/r-reaktivni-lepidla-rezani>
 29. ČSN EN 13887. *Konstrukční lepidla – Směrnice pro přípravu povrchu kovů a plastů před lepením*. Praha: ČESKÝ NORMALIZAČNÍ INSTITUT, 2004.
 30. Řešení lepidel a pásek [online]. [cit. 2021-5-17]. Dostupné z: https://www.3mcesko.cz/3M/cs_CZ/bonding-and-assembly-ctl/training-education/science-of-adhesion/
 31. ČSN 6685: Lepidla. *Zákony* [online]. [cit. 2021-5-17]. Dostupné z: <https://www.zakony.cz/normy/vyroby-chemickeho-prumyslu/normy-lepidla-6685>
 32. ČSN EN 15870. *Lepidla - Stanovení pevnosti tupých spojů v tahu*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2009.
-

33. ČSN EN 1465. *Lepidla – Stanovení pevnosti ve smyku při tahovém namáhání přeplátovaných lepených sestav*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2009.
34. ČSN EN ISO 11339. *Lepidla – T-zkouška v odlupování lepených sestav z ohebných adherendů*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2010.
35. ČSN EN 28510-1. *Lepidla – Zkouška v odlupování zkušebního tělesa z ohebného a tuhého adherendu: Část 1: Odlupování pod úhlem 90 stupňů*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2014.
36. ČSN EN ISO 8510-2. *Lepidla – Zkouška v odlupování zkušebního tělesa z ohebného a tuhého adherendu: Část 2: Odlupování pod úhlem 180 stupňů*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2011.
37. ČSN EN ISO 9653. *Lepidla – Zkušební metoda pro hodnocení rázové pevnosti lepených spojů ve smyku*. Praha: ČESKÝ NORMALIZAČNÍ INSTITUT, 2001.
38. LOCTITE 406. *Lepidlatmely* [online]. [cit. 2021-5-17]. Dostupné z: <https://www.lepidlatmely.cz/loctite-406-20-g-vterinove-lepidlo/>
39. KAVAN PRO. *Peckamodel* [online]. [cit. 2021-5-17]. Dostupné z: <https://www.peckamodel.cz/kav9974-cz-kavan-pro-stredni-vterinove-lepidlo-20g>
40. UHU plast special. *UHU* [online]. [cit. 2021-5-17]. Dostupné z: <https://www.uhu.cz/uhu-plast-special-34-ml-30-g.html>
41. ALTECO 3-TON CLEAR. *Nejlevnější barvy laky* [online]. [cit. 2021-5-17]. Dostupné z: <https://www.nejlevnejsi-barvy-laky.cz/alteco-3-ton-clear-20-g>
42. BISON POWER ADHESIVE. *Lepidla* [online]. [cit. 2021-5-17]. Dostupné z: <https://www.lepidla.cz/cs/p/power-adhezive-65-ml-8710439041605.html>

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Zkratka/Symbol	Jednotka	Popis
ABS		Akrylonitrilbutadienstyren
E	MPa	Modul pružnosti v tahu
E_c	kJ	Kinetická energie
F	N	Působící síla
FDM		Fused deposition modeling
I		Konfidenční interval
L	mm	Délka
PET		Polyethylentereftalát
PLA		Polylactic acid - kyselina polymléčná
S	m^2	Průřez zkušebního tělesa
SLA		Stereolitografie
SLS		Selective laser sintering - selektivní spékání laserem
a	mm	Výška vzorku
a_c	kJ/m^2	Houževnatost Charpy
b	mm	Šířka vzorku
c	mm	Délka přeplátování
h	mm	Tloušťka vzorku
n		Počet hodnot
s		Směrodatná odchylka
t		Kvantil studentova rozdělení
\bar{x}		Aritmetický průměr
α	°	Úhel smáčivosti
ε	%	Poměrné prodloužení
σ	Mpa	Napětí
T_t	MPa	Pevnost v tahu
T_s	MPa	Pevnost ve smyku